



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN
ESPECIALIDAD SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

**MEJORA DEL PROTOTIPO DE SENSOR
BRILLOUIN DISTRIBUIDO BASADO EN LA
TÉCNICA DE ANÁLISIS ÓPTICO DE BRILLOUIN
EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (BOTDA)
DESARROLLADO EN EL DEPARTAMENTO DE
INGENIRÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA DE LA
UPNA**

Felipe López Fernandino

Director

Mikel Sagüés García

Pamplona, 5 de Septiembre de 2012

ÍNDICE

CAPÍTULO 0	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN A LOS SENSORES BOTDA.....	4
CAPÍTULO 2	IMPLEMENTACIÓN DE LA RUTINA BIAS CONTROLLER.	8
CAPÍTULO 3	ESTUDIO DE LA PRECISIÓN DEL SISTEMA SENSOR COMPARADO CON EL SENSOR LUNA.	19
CAPÍTULO 4	ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE FASE ABSOLUTA DETECTADA AL APLICAR STRAIN A UNA ZONA DE LA FIBRA.....	33
CAPÍTULO 5	ESTUDIO DE LA ORTOGONALIDAD OBTENIDA CON EL MÓDULO DGD EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA...	40
CAPÍTULO 6	PUESTA A PUNTO DEL PREAMPLIFICADOR DC-350 MHZ. ...	45
CAPÍTULO 7	DOCUMENTO DESCRIPTIVO DEL SISTEMA DE MEDIDA CON EL SISTEMA SENSOR.....	53
CAPÍTULO 8	CARACTERIZACIÓN DE LA SATURACIÓN DEL EDFA EN FUNCIÓN DEL INTERVALO ENTRE PULSOS.....	61
CAPÍTULO 9	CALIBRACIÓN Y CORRECCIÓN IQ	64
CAPÍTULO 10	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	78
ANEXO I	80
ANEXO II	ESTUDIO DE LA FASE DE LA SEÑAL RF Y DE LA INFLUENCIA DE LOS ARMÓNICOS EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN Y CORRECCIÓN IQ ..	82
ANEXO III	COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE CORRECCIÓN IQ Y CUANTIFICACIÓN DEL ERROR RESTANTE EN LAS SEÑALES TRAS SU CORRECCIÓN.....	86
ANEXO IV	RUTINA BIAS CONTROLLER.....	91
ANEXO V	RUTINA CORRECCIÓN IQ	95
BIBLIOGRAFÍA	106

CAPÍTULO 0

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El planeta que habitamos está cubierto con, además de su naturaleza, construcciones humanas. Carreteras, edificios, puentes, túneles, presas, oleoductos, molinos de viento... todas estas estructuras se han convertido en imprescindibles para la vida humana tal y como la conocemos. Su importancia convierte en asunto de primer orden el mantenimiento de dichas estructuras y para ello, un dato importante es la deformación de las estructuras. Para saber si una infraestructura funciona correctamente, conocer su deformación es imprescindible, por ejemplo, cuando un camión circula sobre un puente, este puente se deforma, y cuando deja de circular por él, recupera su forma inicial. En el momento en el que ya no recupera su forma inicial es cuando corre peligro de derrumbarse. Conociendo su deformación se puede saber si está en estado elástico o plástico. Aquí es donde entra en juego el prototipo sensor BOTDA desarrollado en la UPNA.

Este sensor pertenece a la familia de sensores distribuidos Brillouin, que se basa en el efecto no lineal Brillouin. Este efecto consiste en que, al colisionar dos fotones viajando en sentido opuesto por la fibra óptica, dan lugar a una descarga de energía acústica. La onda acústica se propaga por la fibra variando momentáneamente el índice de difracción de la misma haciendo que la frecuencia de la onda lumínica viajando por ese punto modifique su frecuencia Δf (aproximadamente 10,8MHz en fibra óptica SMF estándar monomodo) por efecto Doppler.

Esta frecuencia de variación Δf , varía linealmente con la temperatura y con la deformación de la fibra. Por tanto, midiendo Δf se pueden deducir variaciones de temperatura o deformación. Los sensores distribuidos Brillouin son sistemas que pueden hacer medidas de deformación unitaria y de temperatura.

Un sensor distribuido Brillouin consta de dos partes:

1. Sistema de análisis: Sistema capaz de medir y cuantificar ciertas propiedades de la señal óptica que se propaga por la fibra de sensado.
2. Fibra de sensado: Fibra acoplada a una estructura.

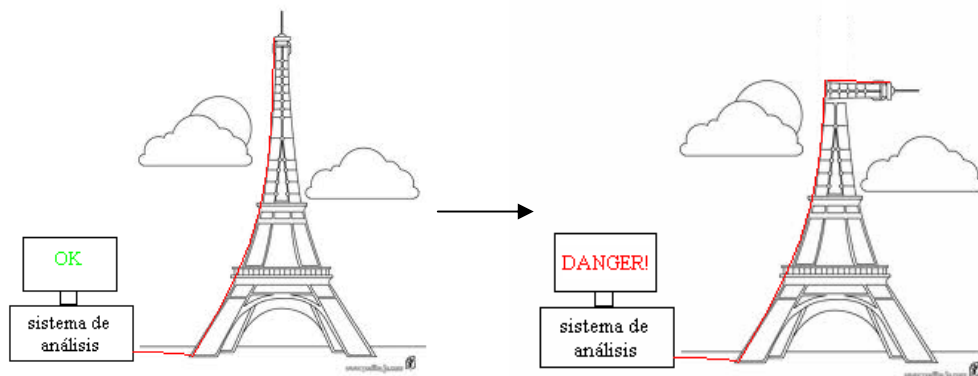


Figura 0. 1 Ejemplo sobre la utilidad de sensores distribuidos Brillouin

Las medidas de deformación unitaria son de un elevado interés en un amplio rango de aplicaciones relacionadas con la monitorización de salud estructural. Por ello, Los sensores ópticos han supuesto una de las áreas de investigación más importantes durante las dos últimas décadas en el campo de la fotónica.

Este proyecto tiene como objetivo mejorar y colaborar en el desarrollo del prototipo sensor brillouin distribuido basado en la técnica de análisis óptico Brillouin en el dominio del tiempo, desarrollado en el Departamento de Ingeniería eléctrica y electrónica de la UPNA. El cual está incorporando novedosas modificaciones al esquema BOTDA clásico. Desarrollando un sistema menos costoso que los actuales y capaz de realizar medidas dinámicas dando lugar a una monitorización de salud estructural en tiempo real. La labor investigadora realizada en este proyecto mejora el prototipo en desarrollo contribuyendo a superar ciertas limitaciones del actual sistema. A continuación se describen las labores realizadas y los objetivos marcados para este proyecto.

Como primer contacto directo con sensores ópticos, se ha realizado una puesta al día sobre los sistemas BOTDA, ello se describe en el primer capítulo de esta memoria.

El esquema del prototipo en desarrollo incluye un modulador electro óptico que realiza una modulación AM en doble banda lateral. El funcionamiento del prototipo exige que se suprima la portadora en esta modulación y ello se realiza manualmente mediante Matlab. Es un trabajo tedioso y por ello, el primer objetivo de este proyecto es la automatización de dicha supresión. Por lo tanto, en el segundo capítulo se explica el proceso de implementación de la rutina Bias Controller, responsable de la estabilización automática del modulador electro-óptico de amplitud. Antes de realizar medidas con el prototipo sensor, es imprescindible estabilizar el modulador. Hasta el momento se hace de manera manual, no es una labor difícil pero es tediosa porque hay que estar pendiente de ello un mínimo de 90 minutos, así que esta rutina despreocupará al equipo de una labor rutinaria.

También se ha considerado oportuno realizar un test de precisión y fiabilidad de las medidas proporcionadas por el prototipo sensor en desarrollo ya que no se ha realizado con anterioridad. Los resultados de este capítulo darán una idea sobre la situación real del prototipo desarrollado en el mercado actual. Para ello se ha realizado una comparación con uno de los mejores sensores de fibra óptica del mercado, el equipo de la casa LUNA, Optical Backscatter Reflectometer™ Benchtop. Así, en el capítulo 3 se contrasta la precisión del prototipo en desarrollo con el sistema mencionado.

Hasta la fecha todos los sistemas sensores distribuidos Brillouin conocidos realizan las mediciones de deformación unitaria a partir del espectro Brillouin en amplitud. Uno de los aspectos más novedosos del prototipo en desarrollo es la realización de medidas de deformación unitaria a partir del espectro Brillouin en fase. Sin embargo, el espectro en fase de una zona de la fibra sin deformar, varía al haber un estiramiento en otra zona de la fibra, por el amento de la longitud de la fibra. Por ello es imprescindible la cuantificación de esa variación de fase absoluta. Otro objetivo de este proyecto, consiste en cuantificar esa variación de fase, y así poder corregir las medidas de fase. De esta manera en el capítulo 4 se estudia la variación de fase absoluta en la fibra al estirar una parte de la misma.



Una de las mejoras que se pretende introducir al sensor BOTDA es el empleo de ondas de bombeo ortogonales en la modulación ODSB-SC. De esta manera se mide por separado la interacción Brillouin de cada una de las bandas laterales, aumentando la precisión del sistema. En la actualidad se trabaja con un módulo DGD, que no ortogonaliza correctamente y en el futuro se pretende incorporar otro DGD cuyas características se adapten mejor al esquema final el prototipo sensor. El capítulo 5 es un estudio de la ortogonalidad obtenida con los dos módulos DGD. Este estudio concluirá cual es el comportamiento de ambos DGDs, definirá los parámetros de uso óptimos y en caso de no utilizarse según dichos parámetros, cual es el nivel de deterioro de la ortogonalización.

Otro de los retos actuales del prototipo sensor en desarrollo, es la realización de medidas “long range”, esto es, mediciones sobre fibras ópticas cuya longitud sea de kilómetros, así se puede monitorizar, por ejemplo, la situación estructural de un gasoducto. En este caso, en el proceso de medición se utiliza el osciloscopio Picoscope, el cual, por sus características técnicas precisa de un preamplificador. De este modo, en el capítulo 6 se propone un proceso de calibración del preamplificador SR445A DC-350 MHz, imprescindible para la recepción de las señales en el osciloscopio Picoscope.

Como todo sistema en desarrollo, el prototipo sistema sensor va cambiando su configuración a lo largo de la investigación. Se considera necesaria la edición de un documento que describa con precisión la metodología de uso del equipo en su estado actual. Así el capítulo 7 es un documento que describe la forma de uso del prototipo en su versión actual, para que nuevas personas que desconozcan la utilización del sensor sean capaces de realizar medidas a partir del documento.

El prototipo incorpora en su sistema de generación de señales un amplificador óptico EDFA. Este amplifica los pulsos antes de que entren a la fibra sensora. Es sabido que si el intervalo entre pulsos es muy pequeño el EDFA deja de amplificarlos correctamente. Se desea saber cual es el menor intervalo entre pulsos con el cual funciona correctamente el prototipo sensor. Se ha caracterizado la saturación del amplificador EDFA en función del tiempo de separación entre los pulsos que pasan por este, para saber en qué momento el EDFA colapsa. Queda documentado en el capítulo 8.

A la hora de recibir la señal resultante de la interacción Brillouin, de la cual se obtienen los resultados de la medición, puesto que es de alta frecuencia (850MHz) se realiza una detección IQ para pasarla a banda base y procesarla. Por las características del sistema existe un error de fase y de amplitud en dicha detección IQ y por ello se realiza una calibración del sistema. Hasta la fecha se realiza de manera manual y el último objetivo de este proyecto final de carrera es a automatización de esa calibración, así como la mejora de la misma. El capítulo 9 describe el proceso de calibración y corrección de las señales recibidas en el demodulador RF en cuadratura, con el fin de corregir efectos indeseados producidos por los dispositivos incorporados en el prototipo.

CAPÍTULO 1

Introducción a los sensores BOTDA.

Los sensores BOTDA son el tipo de sensor Brillouin distribuido en fibra óptica más usado y evolucionado. Es muy útil para resoluciones del orden de metros en fibras de varias decenas de kilómetros, e incluso se está evolucionando para conseguir resoluciones de entorno a centímetros.

Principio general de los sistemas BOTDA

En los sistemas BOTDA, dos ondas se propagan en sentido opuesto en la fibra bajo test, estimulando el proceso de dispersión Brillouin, tal y como se observa en la siguiente figura:

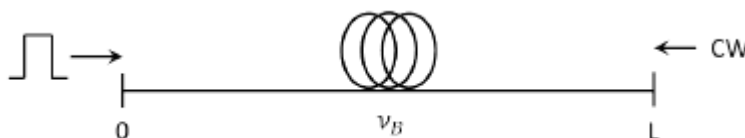


Figura 1.1. Principio de funcionamiento de los sistemas BOTDA.

La onda continua (continuous wave, CW) se propaga con una frecuencia ν_S y los pulsos ópticos a una frecuencia ν_P tal que la diferencia frecuencial entre ambas ondas sea $\nu = \nu_P - \nu_S$ la correspondiente al desplazamiento en frecuencia Brillouin de la fibra, B . Consecuentemente, la CW será amplificada por SBS con las características del punto de la fibra donde interaccione con el pulso. La señal BOTDA resultante del aumento en potencia de la onda continua, se recibirá como función del tiempo tal y como se observa en la Figura 1.2.

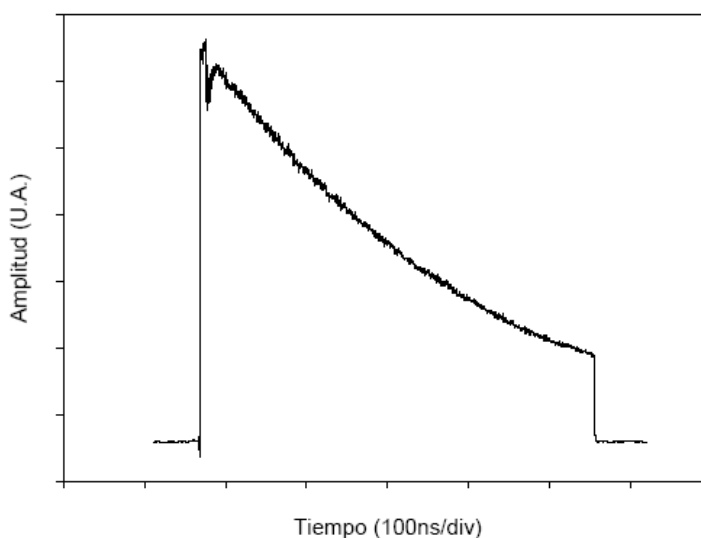


Figura 1.2. BOTDA en ganancia.

Esta función puede traducirse al dominio espacial con la siguiente fórmula:

$$z = \frac{ct}{2n}$$

Donde z es la distancia donde interactúa el pulso con la CW, c es la velocidad de la luz, n el índice de refracción de la fibra y el factor 2 es consecuencia del tiempo que tarda al pulso en propagarse hasta el punto de interacción y el tiempo de propagación de la señal BOTDA resultante hasta el receptor.

La señal BOTDA representada en 2 muestra la interacción Brillouin correspondiente a la frecuencia diferencial dada entre la onda de bombeo (pulsos ópticos) y la Stokes (CW). Si esta diferencia frecuencial se varía, entonces se recibe la señal BOTDA correspondiente a otra frecuencia del espectro en ganancia Brillouin. Consecuentemente, mediante variaciones de la frecuencia de una de las dos ondas se puede reconstruir el espectro Brillouin para cada punto de la fibra (véase Figura 1.3). El valor de las magnitudes temperatura y deformación unitaria se encuentra inspeccionando el valor de ganancia y el desplazamiento del máximo del espectro Brillouin.

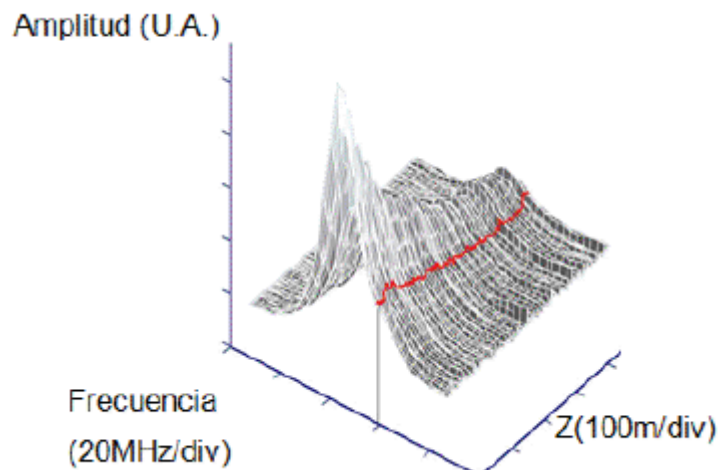


Figura 1.3. Reconstrucción en 3D del espectro Brillouin en la distancia, en rojo podemos observar una de las trazas BOTDA.

Un posible esquema de sensor BOTDA se muestra en la Figura 1.4. En la rama superior se pulsa la señal óptica cuya frecuencia es controlada a través de un láser sintonizable que es el encargado de realizar el barrido en frecuencia. Este barrido en frecuencia tiene como objetivo variar la diferencia frecuencial entre la onda pulsada y la CW que se genera en la rama inferior. La onda continua se propagará a lo largo de la fibra interactuando con los pulsos que transfieren la potencia a la CW y generan la señal BOTDA para cada frecuencia sintonizada. Esta señal se detectará y observará en el osciloscopio. Cada una de las señales con distinta frecuencia se almacenará en un PC donde se reconstruirá el espectro Brillouin (ver Figura 1.3).

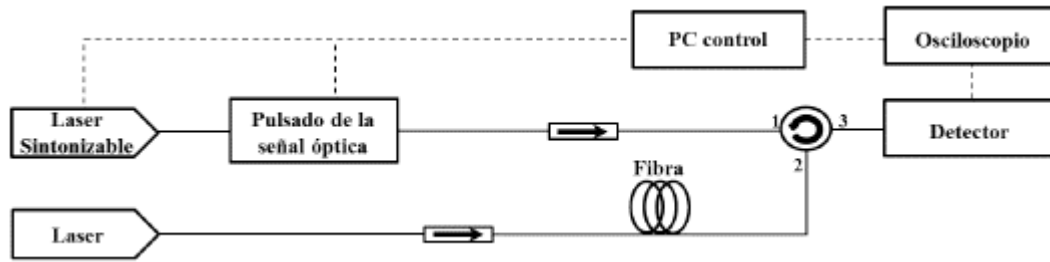


Figura 1.4. Montaje experimental simplificado del sistema BOTDA.

Si no se tiene en cuenta la atenuación característica de la fibra, la potencia de la señal BOTDA viene dada por:

$$P_B = (G - 1)P_{CW} = \left(\exp \left[\frac{\gamma \cdot g_B \cdot P_P}{A} \frac{V_g}{2} \right] - 1 \right) P_{CW}$$

Siendo P_S , P_B y P_P las potencias de la onda continua, la señal BOTDA y el pulso respectivamente, γ es un factor entre 0 y 1 correspondiente a la polarización, y A es el área efectiva del núcleo de la fibra óptica. τ es la anchura del pulso y v_g la velocidad de grupo en la fibra.

La resolución espectral, viene dada por :

$$\delta\nu_B = \frac{\Delta\nu_B}{\sqrt{2}(SNR)^{1/4}}$$

y la resolución espacial por :

$$dz = \frac{V_g \cdot \tau}{2}$$

siendo SNR la relación señal a ruido en detección.

Nótese que a medida que el pulso amplifica la onda continua se irá vaciando, pudiendo introducir errores en la medida . Sin embargo, existe otra posible configuración donde el pulso se amplifica por transferencia de energía de la CW que por el contrario se vacía, obteniendo un espectro de atenuación Brillouin. La diferencia entre ambas configuraciones se basa en la diferencia frecuencial óptica de la onda de Stokes y de bombeo (ver Figura 1.5):

- Si $\nu_B = \nu_P - \nu_S > 0$, entonces el sistema funciona en ganancia. La CW es amplificada mientras el pulso se vacía.
- Si $\nu_B = \nu_P - \nu_S < 0$, entonces el sistema funciona en vaciamiento. La CW se vacía mientras que el pulso se amplifica.

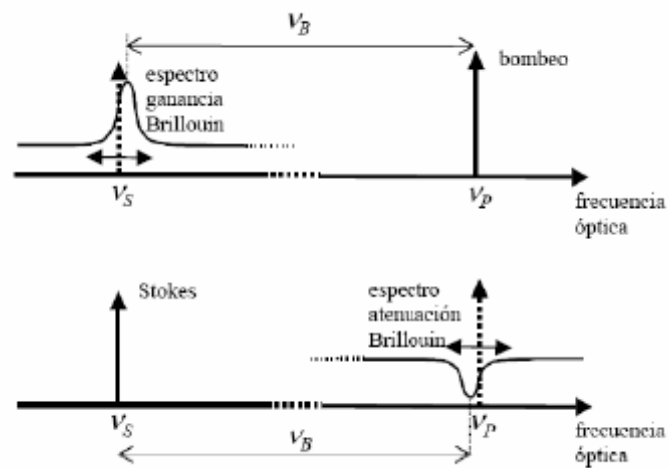


Figura 1.5: Principio de funcionamiento del barrido de SBS, ganancia (superior) y de vaciamiento (inferior).

Los sistemas BOTDA que usan esta técnica son de gran interés, dado que como el pulso no se vacía, de hecho se amplifica a lo largo de la fibra y se consiguen monitorizar fibras más largas [Dem00].

CAPÍTULO 2

Implementación de la rutina Bias Controller.

1-. INTRODUCCIÓN:

El esquema del prototipo en desarrollo incluye un modulador electro óptico que realiza una modulación AM en doble banda lateral (Véase figura 2.1). Este modula una señal óptica mediante una señal de RF. Para ello, además de las dos señales mencionadas, hay un voltaje DC-BIAS que regula la fase de la señal moduladora (RF) respecto de la señal modulada (señal óptica). Cuando ambas están en fase, la portadora de la señal resultante tiene amplitud máxima, y hay otro punto de fase en el que la amplitud de dicha portadora es mínima. En este caso se hace una modulación en doble banda lateral e interesa suprimir la portadora y se hace colocando el modulador en el punto de mínima transferencia. El punto de mínima transferencia es aquel en el que se transmite menor potencia a la portadora, así, aunque no se elimina del todo se reduce al mínimo su interacción con el sistema. La transferencia de energía a la frecuencia de portadora se controla mediante un voltaje de alimentación al DC-BIAS de corriente continua.

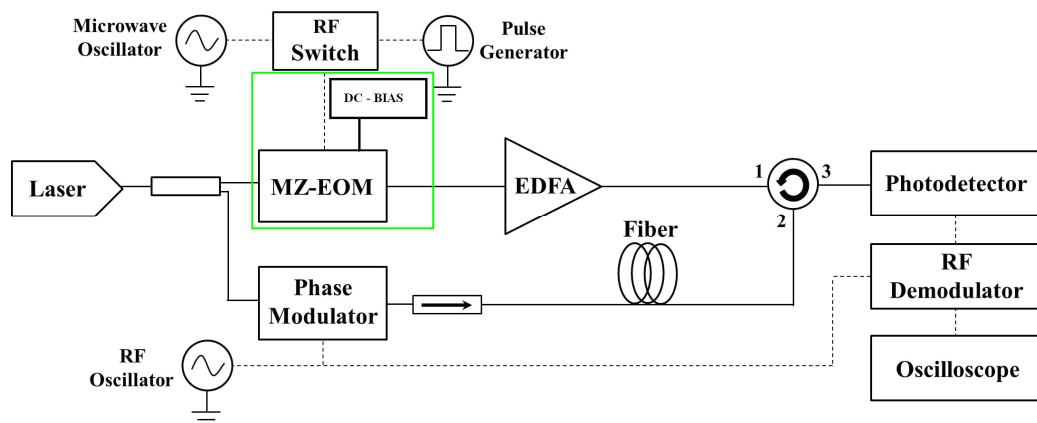


Figura 2.1. Esquema general, sensores distribuidos de fibra óptica basados en Brillouin Optical Time Domain Analysis. Situación del DC-BIAS y del modulador electro óptico MZ-EOM (verde).

Hasta la fecha el control de dicho voltaje DC-BIAS se realizaba manualmente, el modulador, por sus propiedades físicas varía dicha transferencia continuamente y durante, al menos 90 minutos no se estabiliza, por ello cada vez que se desean realizar medidas hay que estar pendiente de regular dicho voltaje cada 5 minutos. Este proyecto ha automatizado el sistema de control del punto de polarización del modulador electro óptico Mach-Zehnder que está integrado en el sistema BOTDA de sensores de fibra óptica diseñado por la UPNA. A continuación se describe la rutina implementada para dicho menester. Puede ver el código en el ANEXO IV.



2-. BASES DE LA RUTINA

2.1 Antecedentes.

Hasta la fecha el control de dicho voltaje se realizaba a través de una rutina implementada en Matlab que ofrecía una interfaz al usuario para que este lo regulase manualmente.

Cuando ocurría un error de tipo Time Out había que cerrar la rutina y volver a iniciarla manualmente.

En caso de cerrar la rutina de manera inadecuada se daba un error de conexión que obligaba a cerrar MATLAB y volver a abrirlo, con los inconvenientes que ello conlleva.

2.2 Requisitos de la nueva rutina.

La rutina deberá ser autónoma, es decir, deberá ser capaz de mantenerse en ejecución durante tiempo indefinido.

Deberá ser capaz de encontrar el punto de mínima transferencia del modulador y situar el voltaje en dicho punto.

Dicho punto deberá localizarse a partir de la potencia de la señal a la salida del modulador amplificada por un EDFA.

No deberá causar errores.

Una vez encontrado el mínimo volverá a buscarlo desde ese punto y así sucesivamente.

2.3 Referencia a Bias-controller comercializados actualmente.

Actualmente los dispositivos diseñados para controlar la DC-BIAS de un electromodulador, lo hacen basándose en la FFT y la facilidad de separar componentes espectrales. Es decir, aplican una variación en el voltaje, procesan la señal de salida y a través de su FFT deducen si el cambio ha sido a mejor o a peor.

Dado que en este caso no precisamos de más información de la señal que de su potencia, nos apartamos de esas posibilidades.

3-. LA RUTINA

Planteamiento:

- Dado que la supresión de la portadora implica una disminución en la potencia de la señal, el punto de menor transmisión (punto en el que queremos situar el modulador) será aquel en el cual la potencia sea un mínimo absoluto.
- Continuamente se recibe el dato de la potencia, así se pueden observar los cambios derivados de nuestra variación del voltaje DC-BIAS. De esta manera se varía el voltaje DC-BIAS hasta obtener un mínimo relativo en la función de la potencia.
- Una vez situado en el mínimo, se continúa la búsqueda de dicho punto ya que no es fijo en el tiempo si no que varía constantemente.

Orden de la rutina:

A continuación se exponen los pasos que sigue la rutina, junto con un diagrama que representa esquemáticamente las características y método de funcionamiento de la rutina.

1. El usuario inicia la rutina
2. Recepción de la potencia enviada por el EDFA. $P(t)$
3. Si la recepción de la muestra es correcta se almacena la muestra, si no se reinicia la conexión.
4. Una vez almacenadas 9 muestras se obtiene una muestra representativa de la ventana.
5. Se deduce si hay que sumar o restar voltaje DC y se opera.
6. Se envía el nuevo valor de voltaje obtenido. $V(t)$
7. Vuelta al paso 1.
8. El programa continúa en ejecución hasta que el usuario decide pararlo.
9. Una vez se para el programa, el voltaje enviado al DC-BIAS es el último mínimo encontrado.

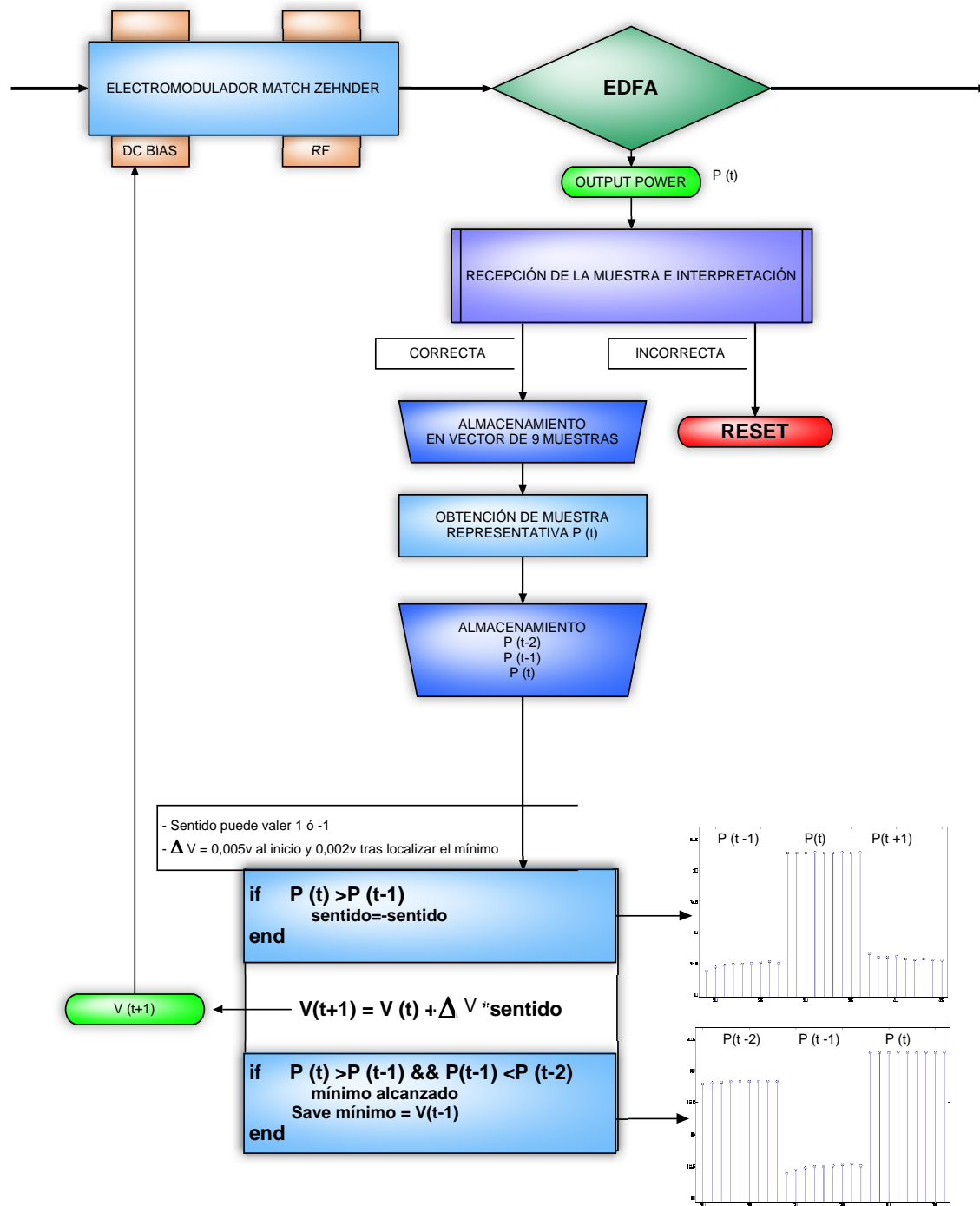


Figura 2.2. Diagrama de bloques de la rutina.

3.1 RECEPCIÓN DE DATOS DEL EDFA

El EDFA envía los datos de la potencia de salida en dBm en una cadena de 15 caracteres de la siguiente forma: PDM2: 17.14 dBm (Particular para el caso de 17,14 dBm).

Para leer el valor de la potencia de salida se toman los caracteres del 7º al 11º de la cadena y se interpretan como un número. Hasta aquí Matlab lo hace fácilmente. Surge, sin embargo, la primera incertidumbre a tratar cuando el dato es enviado de forma errónea por el EDFA. Se han captado trazas de envío de datos por el EDFA para identificar dichos errores, y son los siguientes:

PDM2:117.17 dBm Mayor potencia de la que realmente hay.

PDM2: 1..16 dBm Envío de una punto en vez de un número.

PDM2: 16..87 dBm Envío de dos puntos.

Se concluye:

- Un error de escritura por parte del EDFA viene seguido de un número indeterminado de errores del mismo tipo.

- Acompañando a estos errores o independientemente de ellos ocurren “Time Out”, es decir no se reciben datos en el ordenador porque el EDFA deja de enviarlos. Este error se prolonga indefinidamente en el tiempo.

- Dada la naturaleza caótica de dichos errores, la solución a ellos consiste en reiniciar la comunicación con el EDFA de manera automática, autónoma y lo más rápidamente posible.

3.2 BÚSQUEDA DEL MÍNIMO

Para buscar el punto de mínima transferencia se enventana la señal. La ventana escogida son 9 muestras ya que se considera un tamaño que nos permite obtener un valor representativo de la señal en ese intervalo. Hay que contar con factor de ruido y oscilaciones producidas por la señal pulsada de RF que atraviesa el sistema causando espúreos y picos de potencia. Estos picos duran el intervalo de una o dos muestras, por ello se toma el tamaño de ventana de 9 muestras.

Una vez enventanada la señal se ha experimentado con los siguientes métodos para la obtención de un valor representativo de la señal:

Mínimo: Valor fiable.

Media: Valor aproximado pero no exacto del valor representativo real.

Mediana: Valor aproximado pero no exacto del valor representativo real.

Moda: Valor fiable.

Correlación: Valor exacto pero exige mayor carga computacional sin aportar mejora significativa.

En las Figuras 2.3 y 2.4 se comparan los valores obtenidos con los distintos métodos utilizados para la obtención de la muestra representativa. Se evalúa en caso de tener el ROHDE apagado y en caso de tenerlo encendido.

MINIMO	MEDIA	MEDIANA	MODA	CORRELACION
18,67	18,687	18,69	18,69	18,69

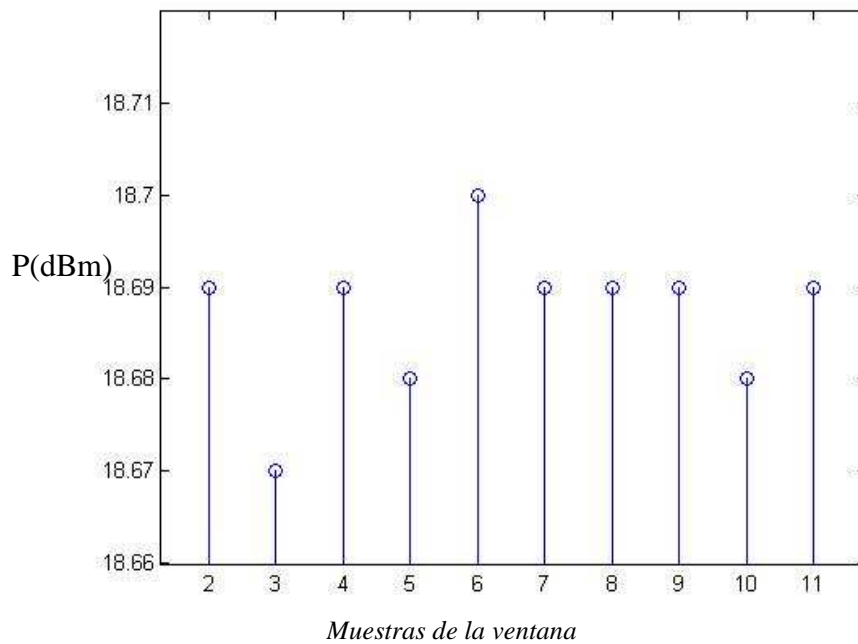


Figura 2.3. Trama tipo de la señal con el ROHDE apagado.

MINIMO	MEDIA	MEDIANA	MODA	CORRELACION
17	17,0336	17,0100	17	17

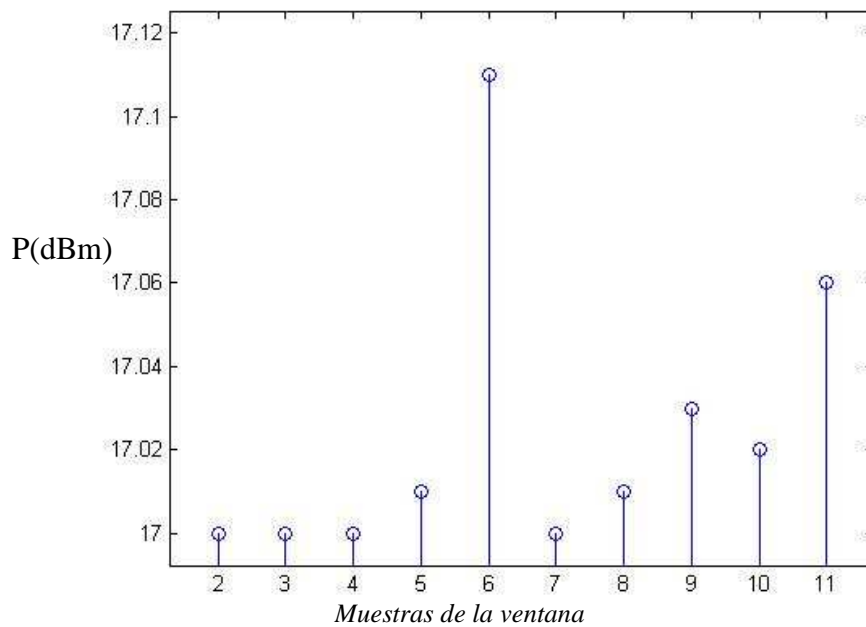


Figura 2.4. Trama tipo de la señal con el ROHDE encendido.

Como podemos ver los métodos de la moda, mínimo y correlación nos dan el valor representativo de la señal, sin embargo, se descarta el método de la autocorrelación por dar mayor carga computacional sin aportar mejoras en este caso.

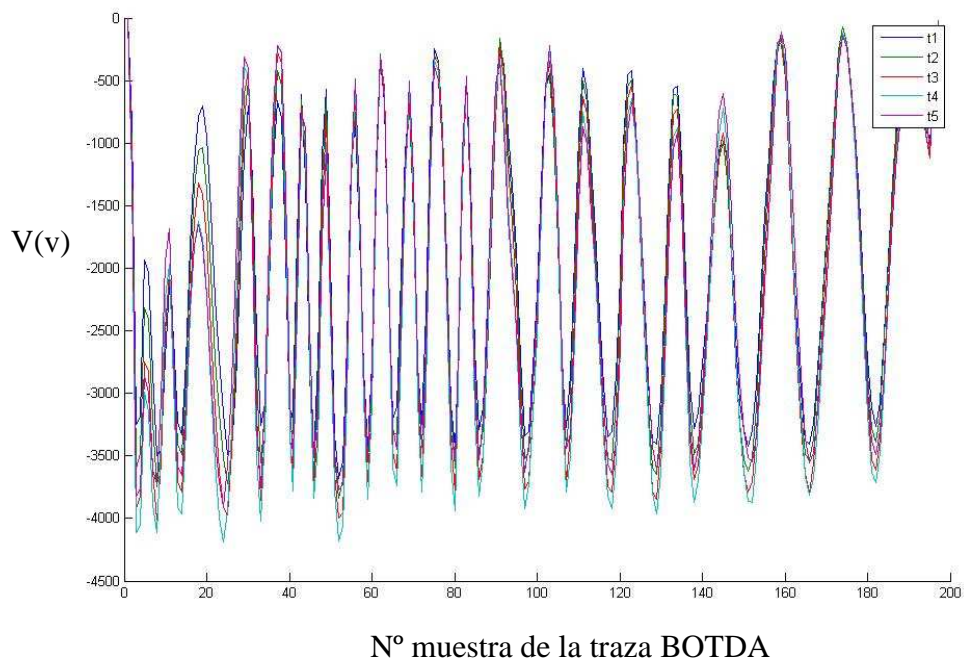


Figura 2.5. Trazas BOTDA tomadas tanto con el mínimo y con la moda

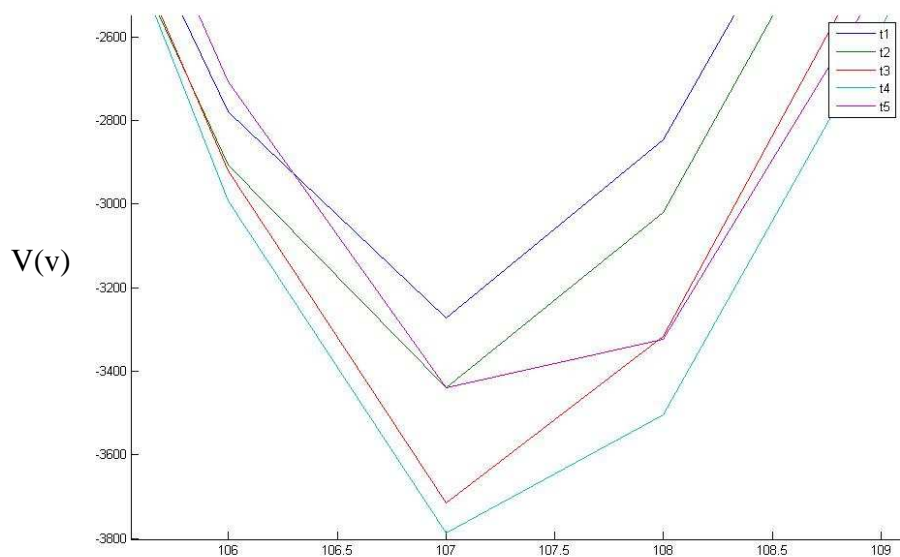


Figura 2.6. Detalle de un pico de las trazas BOTDA de la figura 5. $t_5 > t_4 > t_3 > t_2 > t_1$

Se han tomado trazas BOTDA durante tres horas con la rutina trabajando. Durante este tiempo se ha alternado en la búsqueda de la muestra representativa a través del mínimo y la moda. Las figuras 2.5 y 2.6 nos muestran trazas captadas en momentos en los que el operador era la moda y momentos en los que lo era el mínimo. Se buscaba una tendencia clara distinguible entre ambos operadores pero como se observa en el detalle de la figura 2.6 las diferentes trazas se entrecruzan.

Se concluye que el método de obtención de la muestra representativa, bien sea el mínimo o la moda, no aportan mejoras considerables el uno sobre el otro. Se decide tomar el mínimo.



3.3 RECUPERACIÓN DE ERRORES

El sistema debe trabajar con autonomía y ello exige que no haya errores. Como se ha dicho anteriormente, el EDFA tiene errores de escritura que dan lugar a errores en MATLAB. Estos errores no se pueden reparar o evitar, por ello lo que se hace es detectar el error y actuar en consecuencia. Así cada vez que detectemos un error, el programa se auto-reinicia.

Esto se hace mediante:

1. Una estructura Try-Catch que en caso de haber un error de comunicación a causa de una mala escritura del EDFA reinicia la comunicación con el mismo.
2. Una estructura If-Then para que en caso de ocurrir un *Time out* se reinicie la comunicación.

Para corregir el error de comunicación con los dispositivos derivado de un cierre incorrecto de la aplicación se inhabilita el pulsador que cierra la figura para evitar errores de comunicación a causa de cerrar la rutina de maneja inadecuada.

Para evitar un sobre calentamiento del modulador, se coloca una estructura If-Then que mantiene el voltaje siempre por debajo de los 9 voltios, (este valor se puede modificar pero en este caso es un voltaje prudencial para que no se queme el modulador electro-óptico). De la misma manera, el voltaje se mantiene por encima de los 0,5 voltios.

4.-ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

-El programa ha llegado a trabajar durante 7 horas con total autonomía y ha sido parado por el usuario.

-Hasta la fecha, el programa no se ha parado a causa de un error, tras varios meses de uso.

-Obtención de la muestra representativa:

Mínimo o moda ofrecen un valor representativo que refleja la tendencia del modulador en el momento. Se toma el mínimo.

-Módulo de la variación de voltaje:

1. Cuanto mayor sea, los cambios implican alejarse más del punto de mínima transferencia.
2. Cuanto menor sea, los cambios implican alejarse menos del punto de mínima transferencia pero estar más tiempo buscándolo.
3. Se concluye que 0,002 v es una buena variación ya que mantiene el sistema muy cerca del punto de mínima transferencia. Una variación menor no es correcta ya que el modulador varía más rápido, quedando el programa estático. Para llegar más rápido al mínimo se comienza con 0,005 v pero una vez hallado el punto de mínima transferencia, la variación pasa a ser de 0,002 v.

-Tamaño de la ventana:

Hay que contar con factor de ruido y oscilaciones producidas por la señal pulsada de RF que atraviesa el sistema causando picos de potencia. Estos picos duran el intervalo de una o dos muestras, por ello se toma el tamaño de ventana de 9 muestras.

-Se ha creado un programa ejecutable, *.exe, el cual permite su ejecución independiente de Matlab (utiliza únicamente su compilador), así se puede utilizar simultáneamente Matlab. Esto ha permitido la captura por vez primera, de trazas BOTDA al mismo tiempo que se está ejecutando el control del DC-BIAS. Sin embargo, no se puede acceder al Holtzsworth durante la ejecución del programa ya que los dos utilizan el mismo puerto serie.

-Búsqueda de patrón de comportamiento del modulador:

Se ha buscado un patrón o tendencia del modulador en el tiempo pero como se ve en las siguientes figuras no se ha obtenido un patrón claro.

- **Búsqueda de mínimos.** Se ha comprobado si el voltaje que da lugar a un mínimo se repite de manera periódica pero no lo hace.

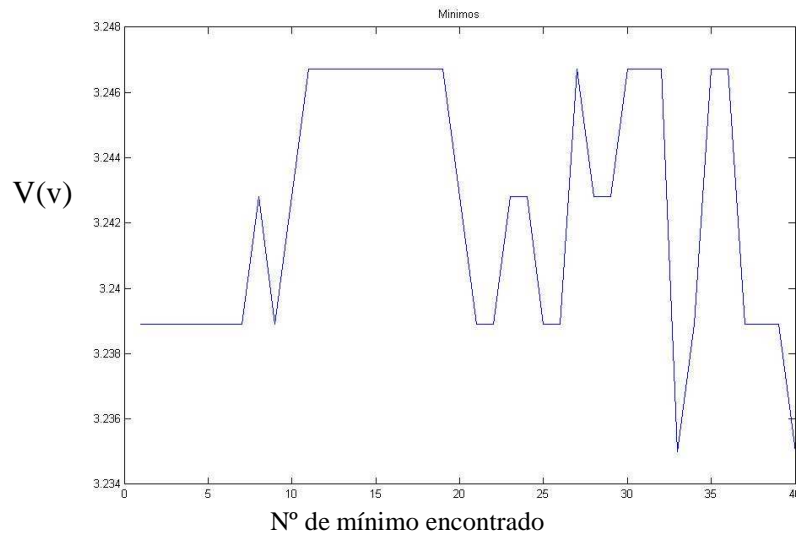


Figura 2.7. Voltajes que han dado lugar a mínimos de potencia.

Los valores de voltaje mínimo no varían de forma periódica. Sí que se repiten pero de manera aleatoria.

- **Búsqueda de la curva característica del modulador**

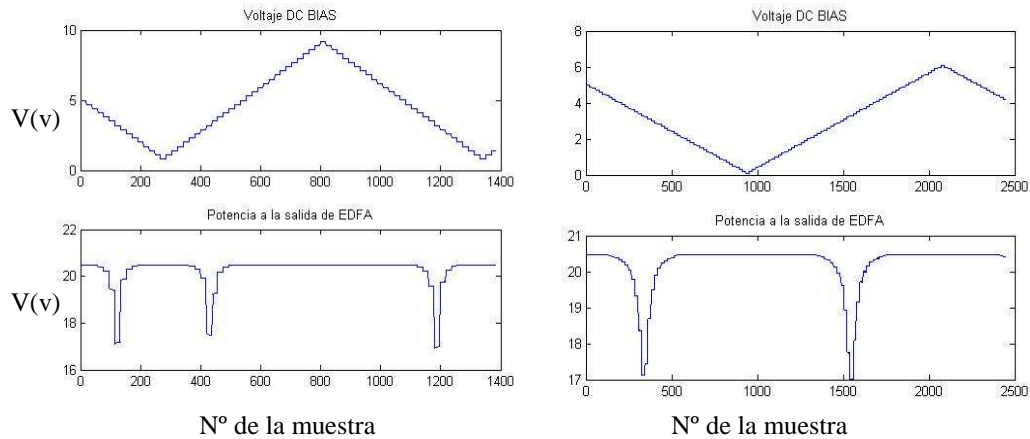


Figura 2.8. Voltajes en el DC-BIAS (arriba) y potencia a la salida del EDFA (abajo).

Se ha buscado la curva característica del modulador. Además de que la potencia del EDFA satura en 20,5 v no se ha obtenido una curva característica ya que entre 0 y 9 v (no se aplican más de 9v por seguridad) sólo se ha encontrado un punto de mínima transferencia, con lo cual no se obtiene $V\pi$.

Se observa que el mínimo está en torno a los 3v pero esto varía según el día y la hora de manera aparentemente aleatoria.

- **Variación de potencia a la salida sin variar el voltaje DC-BIAS.**

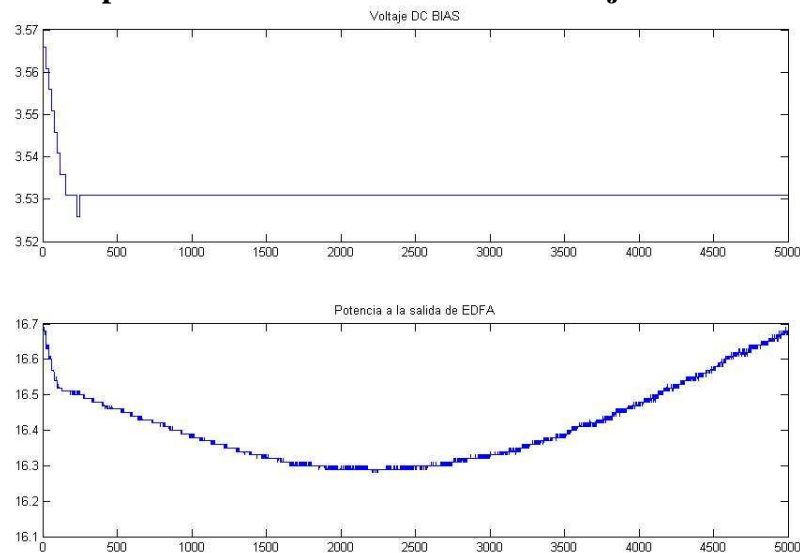


Figura 2.9. Voltajes en el DC-BIAS (superior) y potencia a la salida del EDFA (inferior).

Por último, se ha buscado una tendencia de variación en la potencia de salida del modulador. Para ello se ha buscado un voltaje en el cual hay mínima transferencia de potencia y se ha mantenido este voltaje durante periodos de 5 minutos. Observando la gráfica, se ve que la potencia decae y después vuelve a aumentar indefinidamente. No se ha extraído un patrón de esta observación porque en todas ellas la pendiente de subida de la potencia es distinta y aleatoria.

5-.CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado una rutina que funciona de manera autónoma y mantiene el sistema muy cerca del punto de mínima transferencia, permitiendo la obtención de una traza BOTDA con una amplia relación señal-ruido.
- Dicho punto se localiza a partir de la potencia de la señal a la salida del modulador amplificada por un EDFA.
- Debido a los canales de comunicación en el sistema, la rutina no se puede utilizar simultáneamente mientras se están realizando las medidas y esto sería lo ideal.
- Se ha creado un programa ejecutable, *.exe, el cual permite su ejecución independiente de Matlab (utiliza únicamente su compilador), lo que permite que se hayan capturado por vez primera, trazas BOTDA al mismo tiempo que se está ejecutando el control del DC-BIAS.
- Se recomienda crear distintos canales de comunicación para cada dispositivo y así poder actuar sobre todos ellos simultáneamente.
- El programa, tanto para Matlab (debidamente comentado) como el *.exe, se encuentran en la carpeta Bias_Controller en el archivo adjunto a esta memoria.

Capítulo 3

Estudio de la precisión del sistema sensor comparado con el sensor LUNA.

1.-INTRODUCCIÓN

Se considera necesario comprobar la precisión y fiabilidad de las medidas proporcionadas por el prototipo sistema sensor BOTDA. Para ello se han contrastado los resultados ofrecidos por el prototipo con los resultados ofrecidos por un sistema sensor de fibra óptica puntero en el mercado: el LUNA Optical Backscatter Reflectometer™ (OBR).

El OBR utiliza barrido de longitud de onda interferométrica (SWI) para medir la retrodispersión de Rayleigh en función de la longitud de la fibra óptica con alta resolución espacial. Un estímulo externo (como un cambio de tensión o temperatura) provoca cambios temporales y espectrales en el patrón local de retrodispersión de Rayleigh. El OBR mide estos cambios y deduce una temperatura distribuida o medición de la deformación. En fibras de hasta 70m de longitud, la medida proporcionada por el OBR de tensión y temperatura tienen una resolución de $1\mu\text{strain}$ y $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

Se ha realizado un test de precisión de medida de strain de sensores de fibra óptica distribuidos basados en la técnica de análisis Brillouin óptico en el dominio del tiempo. Para ello se ha medido un strain (conocido) aplicado a una fibra con el prototipo sensor BOTDA desarrollado en el departamento de ingeniería eléctrica y electrónica de la UPNA y el equipo comercial de máxima precisión LUNA. Una vez realizadas las medidas se han contrastado obteniéndose así una valoración de la precisión del sistema en desarrollo en la UPNA. A continuación se describe el método seguido en la realización de este estudio.

2.- DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTO

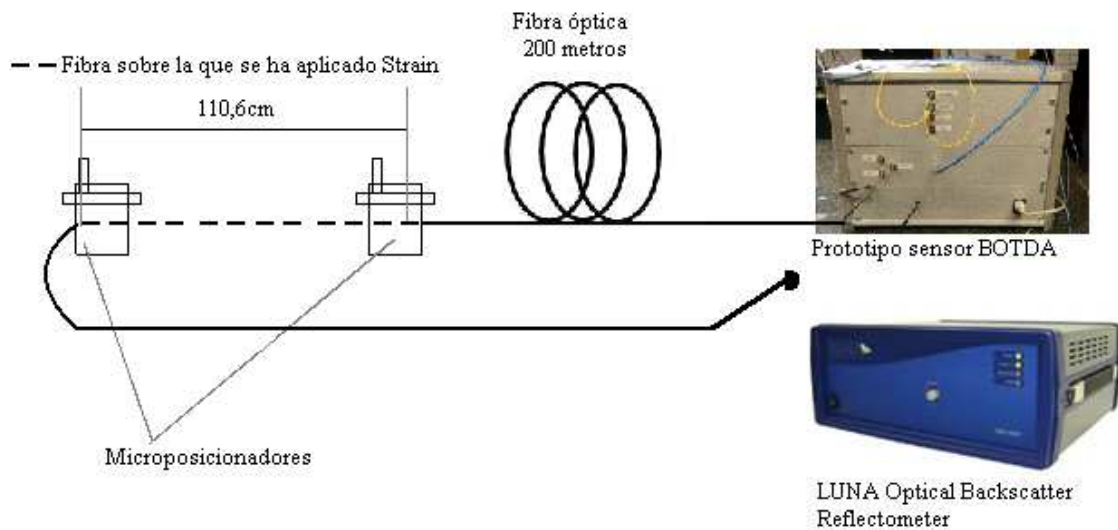


Figura 3.1 – Dispositivo experimental utilizado en la medición.

Se ha utilizado un carrete de fibra óptica. Se ha seleccionado un segmento de dicha fibra (véase figura 3.1) y se ha fijado por sus extremos con loctite sobre dos microposicionadores alineados. Una vez bien fijada la fibra, se han seguido los siguientes pasos:

1. Se ha sensado con el LUNA (2 mediciones)
2. Se ha sensado con el BOTDA (5 mediciones)
3. Se ha aplicado strain de XXX μm
4. Se ha sensado con el BOTDA (5 mediciones)
5. Se ha sensado con el LUNA (2 mediciones)
6. Se ha colocado el strain en cero.
7. Se vuelve a 1.

Se ha realizado dicho procedimiento para XXX=500, 1000 y 1500.

Una vez realizadas las medidas se han procesado los datos de las mediciones, para obtener un valor representativo de cada medición:

- **BOTDA**

- a. Se comprueba que el error de las medidas es inferior a la precisión del sistema.
- b. Se localizan los puntos correspondientes al tramo de fibra sujeto entre los microposicionadores.
- c. Se promedian las cinco mediciones y así obtenemos una curva BFS que caracteriza el momento de la medición. Este punto se realiza tanto para las medidas de fase como para las de módulo.
- d. Se comparan los BFS obtenidos de las medidas 2 y 4, para cada strain aplicado a la fibra. Se obtiene un valor que expresa la variación de BFS (MHz) entre las dos medidas.



- e. Se realiza un promediado de la variación de BFS obtenida en el paso anterior para los puntos correspondientes al tramo de fibra sujeto entre los microposicionadores.
- f. Una variación de 1MHz corresponde a una variación de $20\mu\epsilon$. Se multiplica el valor obtenido por 20 y se obtiene un valor de strain.

- **LUNA**

Se ha realizado un estudio sobre la linealidad del equipo LUNA al aplicar strain a una zona de la fibra e incrementarlo linealmente. Esto se ha hecho para una posterior comparación de la precisión de los equipos LUNA y BOTDA.

El estiramiento de la fibra se ha realizado con microposicionadores.

El procedimiento de medida ha sido el siguiente:

Medida	Elongación	Elongación Total	Nº de medidas
I	0 μm	0 μm	1
II	+10 μm	10 μm	2
III	+10 μm	20 μm	2
IV	+10 μm	30 μm	2
V	+10 μm	40 μm	2
VI	+10 μm	50 μm	2
VII	+10 μm	60 μm	2
VIII	+10 μm	70 μm	2
IX	+10 μm	80 μm	2
X	+10 μm	90 μm	2
XI	+10 μm	100 μm	2
XII	-10 μm	90 μm	2
XIII	-10 μm	80 μm	2
XIV	-10 μm	70 μm	2
XV	-10 μm	60 μm	2
XVI	-10 μm	50 μm	2
XVII	-10 μm	40 μm	2
XVIII	-10 μm	30 μm	2
XIX	-10 μm	20 μm	2
XX	-10 μm	10 μm	2

TABLA 3.1. Medida para la calibración del equipo LUNA OBR.

El procesado de las medidas ha sido el siguiente:

- a. A partir de las medidas 2 a 20, tomando como referencia la medida 1, se obtienen los valores de strain aplicados a la fibra en los pasos II a XX. El resultado de este proceso puede verse en la figura 3.2.
- b. Se aíslan para todas las medidas los valores pertenecientes a la zona de la fibra sobre la que se aplica strain.

- c. Nótese que en ciertos puntos de la fibra, el strain calculado desciende casi hasta cero. Esto no se esperaba y no se consideran valores válidos, por lo que dichos puntos se han descartado para el procesado de las medidas.
- d. Una vez tomados únicamente los valores válidos, se han promediado todos los valores obtenidos en cada medida resultando un único valor por medición. Dichos valores se han promediado agrupando todos los valores que corresponden a una misma elongación, es decir, se promedian los valores de las medidas:
- | | | | | |
|----------|---------|---------|----------|---------|
| - 2 y 20 | -3 y 19 | -4 y 18 | -5 y 17 | -6 y 16 |
| - 7 y 15 | -8 y 14 | -9 y 13 | -10 y 12 | -11 |
- e. Habiéndose obtenido un valor por cada elongación aplicada se obtiene la figura 4.

Strain obtenido con el LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600

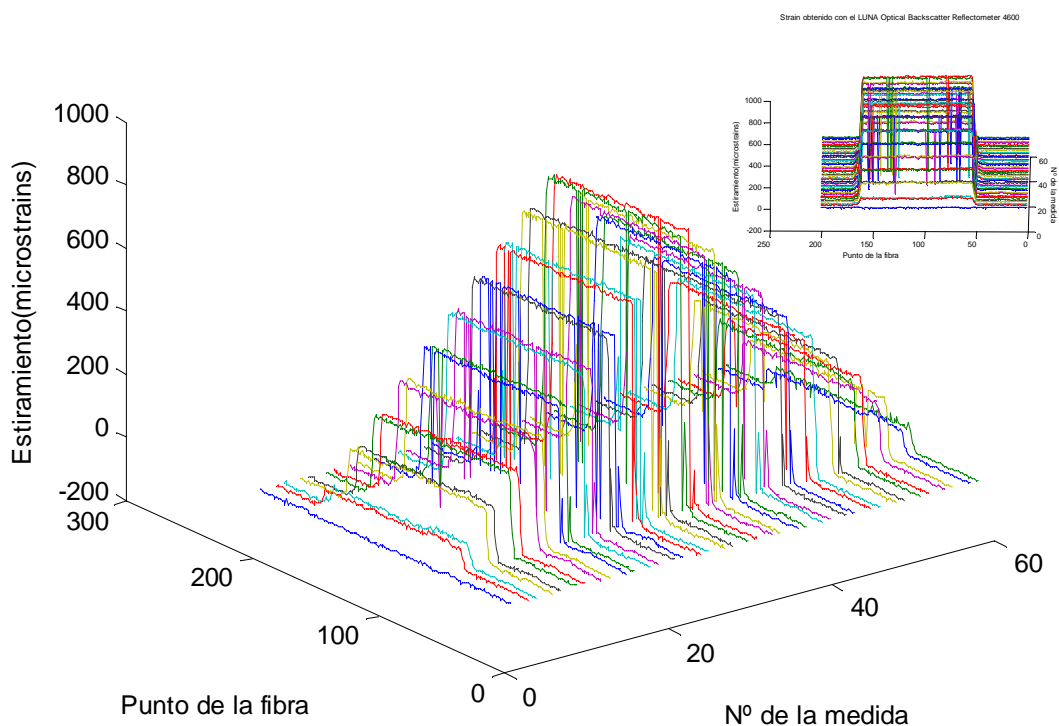


Figura 3.2. Strain obtenido con el LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600

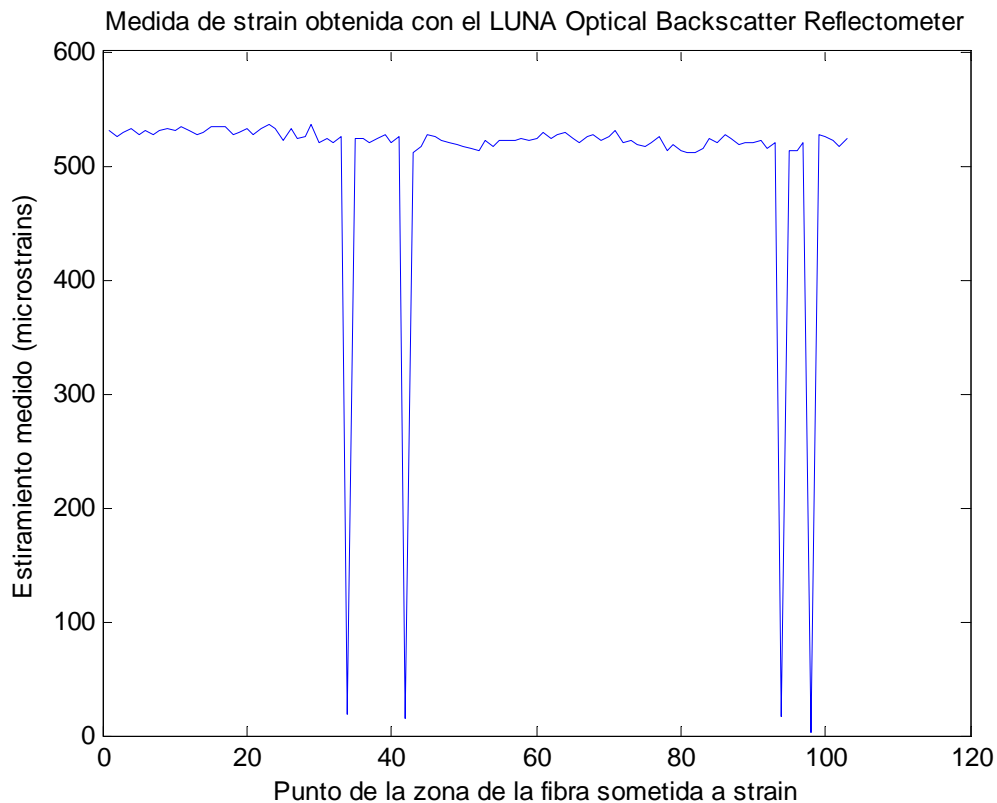


Figura 3.3. Strain obtenido con el LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600.

En la fibra se aplica un strain que actúa sobre la fibra de manera ininterrumpida, sin embargo, en las mediciones realizadas con el LUNA Optical Backscatter Reflectometer 4600 se han obtenido medidas de la forma de la figura 3.3.

Los valores que tienen un módulo cercano a cero se consideran errores, por ello se han descartado en el procesado de los datos.

La distribución de valores de strain no válidos obtenidos en la medida (véase figura 3, picos en la zona de strain) es aleatoria.

• CÁLCULO DEL STRAIN APLICADO

Se han aplicado tres strain diferentes. Los sensores nos proporcionan el dato del estiramiento de la fibra en μm . Conociendo la longitud de la fibra y la longitud de elongación de la misma obtenemos el dato de los strains aplicados:

Longitud de la fibra: 110,6 \pm 0,1 cm

Elongación de la fibra: 500 \pm 10 μm

1000 \pm 10 μm

1500 \pm 10 μm

Strain = 100 cm * Elongación de la fibra μm / Longitud de la fibra

500 $\mu\text{m} \approx 452,1 \mu\epsilon$

1000 $\mu\text{m} \approx 904,2 \mu\epsilon$

1500 $\mu\text{m} \approx 1356,2 \mu\epsilon$

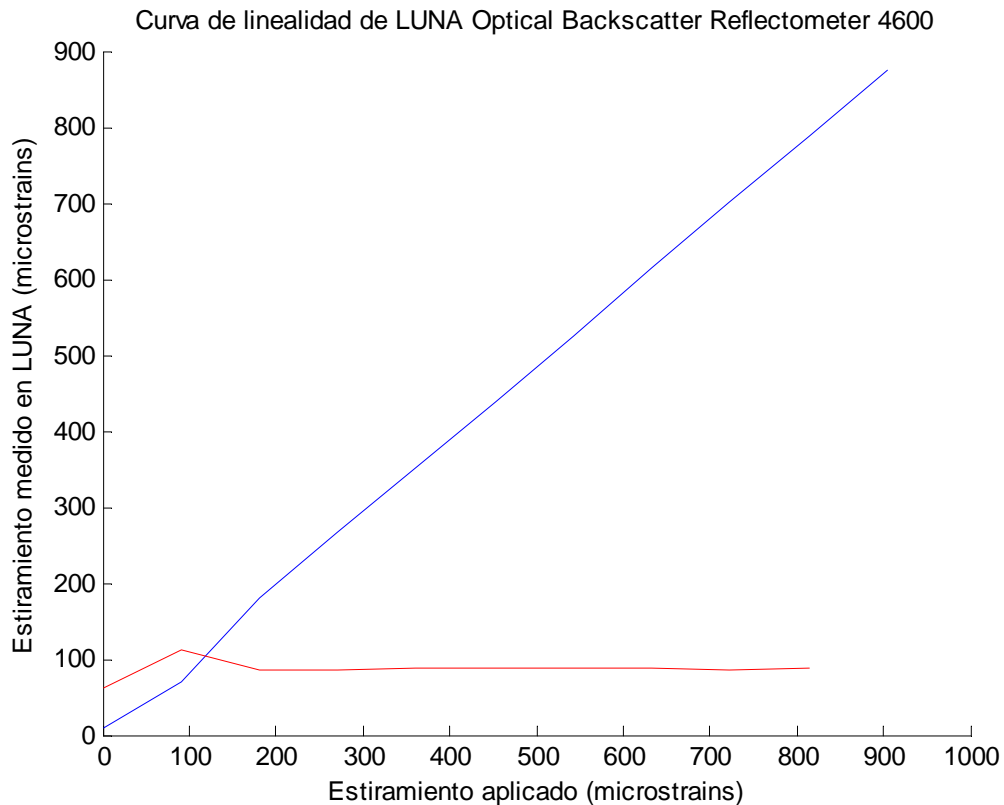


Figura 3.4. Strain medido en función de la elongación aplicada (azul) y pendiente del strain medido en función de la elongación (rojo).

Se realiza un promediado de la pendiente del strain medido en función del strain aplicado. Se comprueba que dicha pendiente es una función lineal, por ello se obtiene un factor de corrección adicional al de la fibra SMF-28 (que es el modelo de fibra que por defecto utiliza el equipo LUNA). Se obtiene hallando el cociente entre el strain medido y el strain aplicado. Este parámetro nos servirá para ajustar la calibración de las medidas realizadas con el LUNA a la fibra en cuestión que estamos utilizando. Para dicha fibra $\alpha=1.0263$.

El factor de corrección se ha obtenido únicamente con medidas de strain aplicado mayor que $200\mu\epsilon$.

Una vez realizada esta medida de calibración

- b. Se localizan los puntos sobre los que se aplica el strain.
- c. Se promedia el valor obtenido en dichos puntos, para cada una de las dos mediciones.
- d. Se comparan las medidas 1. y 5. Esto aporta un valor de strain.

3.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se han obtenido los siguientes resultados:

μm Aplicados	$\mu\epsilon$ Aplicados	$\mu\epsilon$ Medidos			
		BOTDA		LUNA	
		MODULO	FASE	Medido	Corregido
500	452,07957	458,5386	416,981	441	452,5983
1000	904,15913	917	854,2931	881	904,1703
1500	1356,2387	1354,9	1315,6	1314	1348,5582

TABLA 3.1. Resumen de los resultados obtenidos

En la Tabla 3.1, los resultados medidos por el BOTDA, a partir del módulo son muy aproximados a los strains aplicados. Teniendo en cuenta que el error del BOTDA es de 20 μs , dichas medidas se consideran correctas.

Los valores obtenidos por el LUNA, se han corregido con el factor obtenido en el apartado anterior y son muy aproximadas a los Strains aplicados. Esto corrobora que los valores aportados por el sensor BOTDA a partir de módulo, son buenos.

Los resultados obtenidos por el BOTDA, a partir de la fase, difieren en más de 20 $\mu\epsilon$, por ello se consideran resultados no correctos.

$$\text{Strain} = 452,1 \mu\epsilon$$

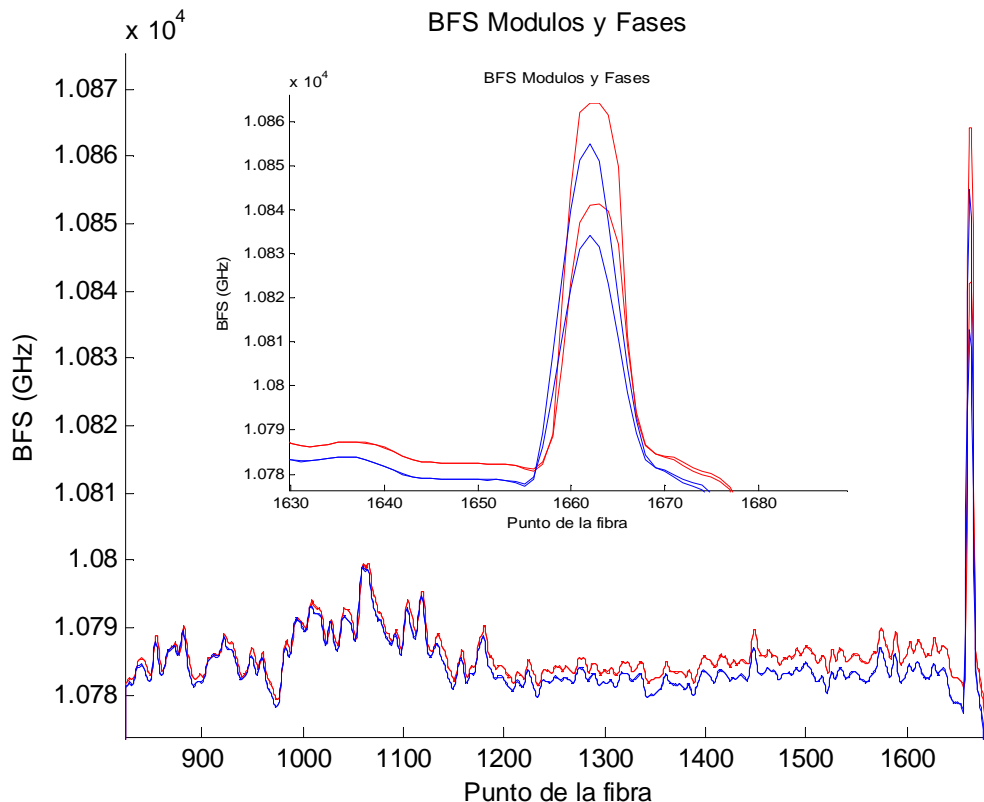


Figura 3.5- BFS detectados en sensores distribuidos BOTDA tanto en fase (azul) como a partir del módulo (Rojo). Para un strain de 452,1 $\mu\epsilon$.

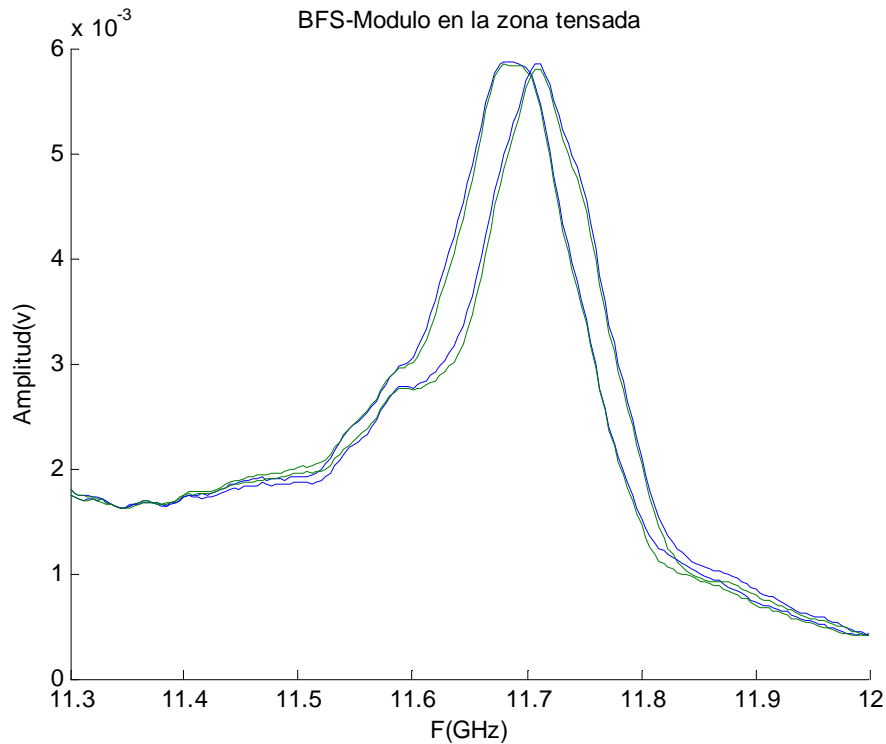


Figura 3.6– Espectro en módulo detectado en dos puntos de la fibra en los que se aplica strain, antes y después de ser aplicado. Para un strain de 452,1 $\mu\epsilon$.

Obsérvese que entorno a 11,6 GHz hay otro lóbulo de interacción brillouin, esto significa que la medida está realizada sobre 1m de la fibra y que una pequeña porción de este metro se encuentra fuera de la zona de strain. Con lo cual la medida está contaminada y pese a dicha contaminación, el resultado es correcto.

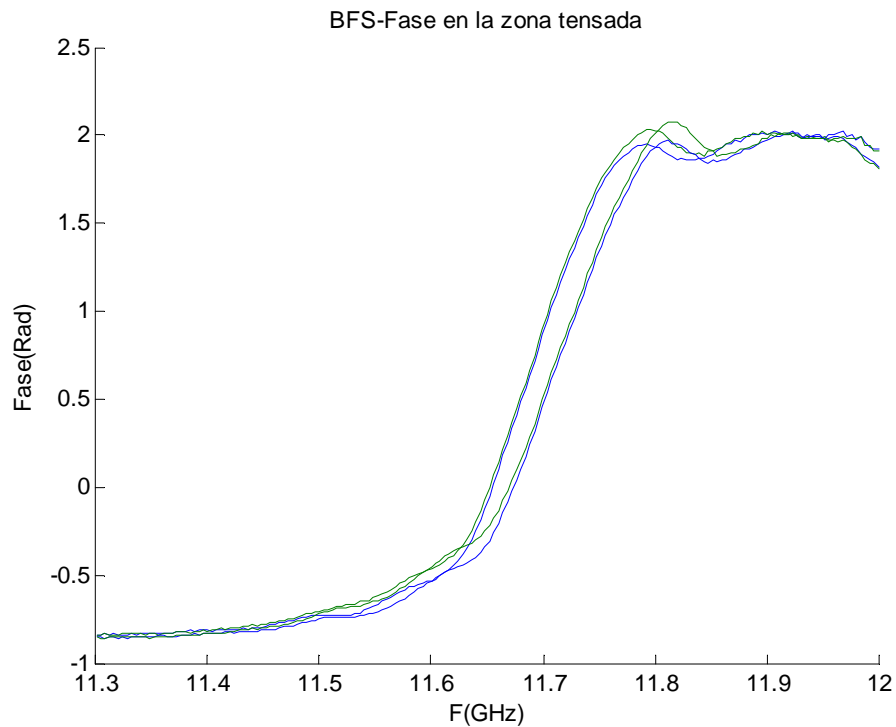


Figura 3.7– Espectro en fase detectado en dos puntos de la fibra en los que se aplica strain, antes y después de ser aplicado. Para un strain de 452,1 $\mu\epsilon$.

$$\text{Strain} = 904,2 \mu\epsilon$$

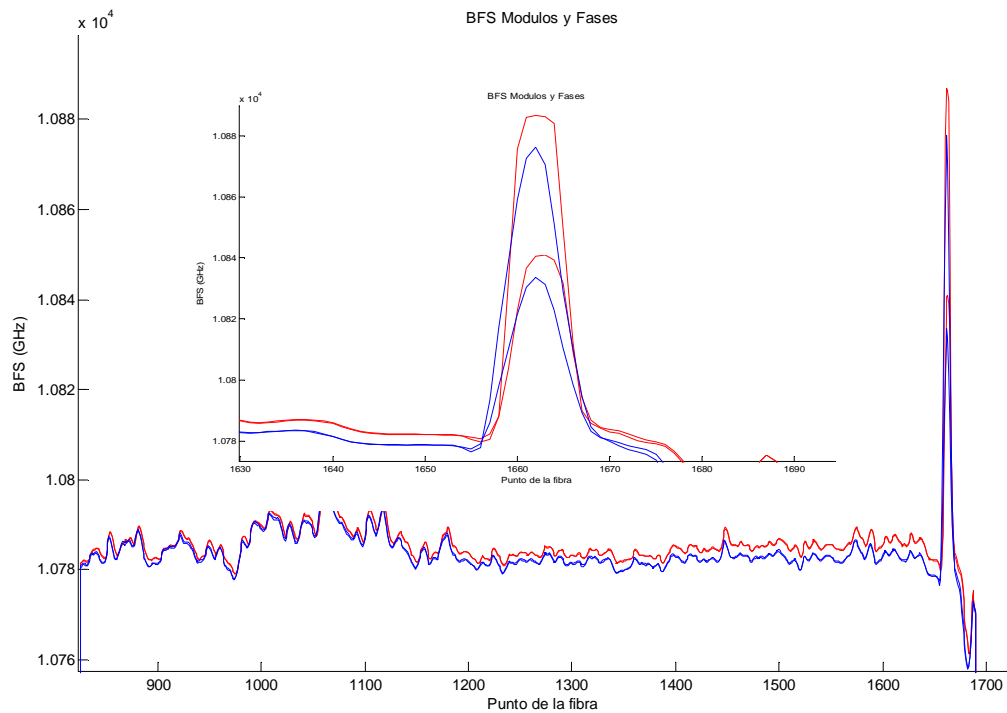


Figura 3.8- BFS detectados en sensores distribuidos BOTDA tanto en fase (azul) como a partir del módulo (Rojo). Para un strain de $904,2 \mu\epsilon$.

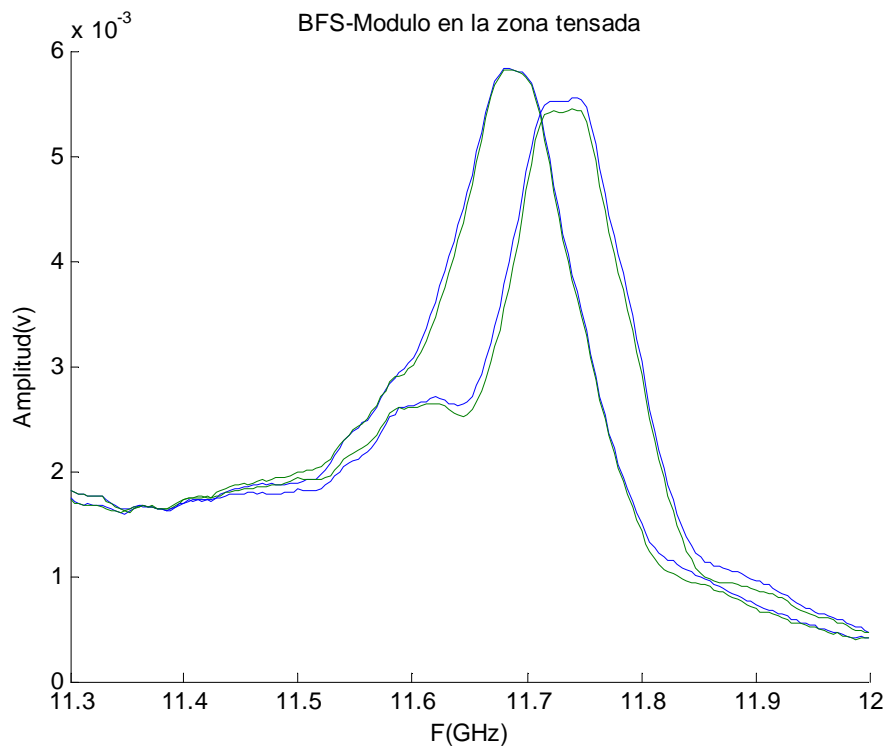


Figura 3.9- Espectro en módulo detectado en dos puntos de la fibra en los que se aplica strain, antes y después de ser aplicado. Para un strain de $904,2 \mu\epsilon$.

Al haber mayor strain que en el caso de $452 \mu\epsilon$, el espectro de la medida una vez aplicado el strain, se desplaza más hacia la derecha, viéndose mejor el espectro indeseado en torno a 11,6 GHz.

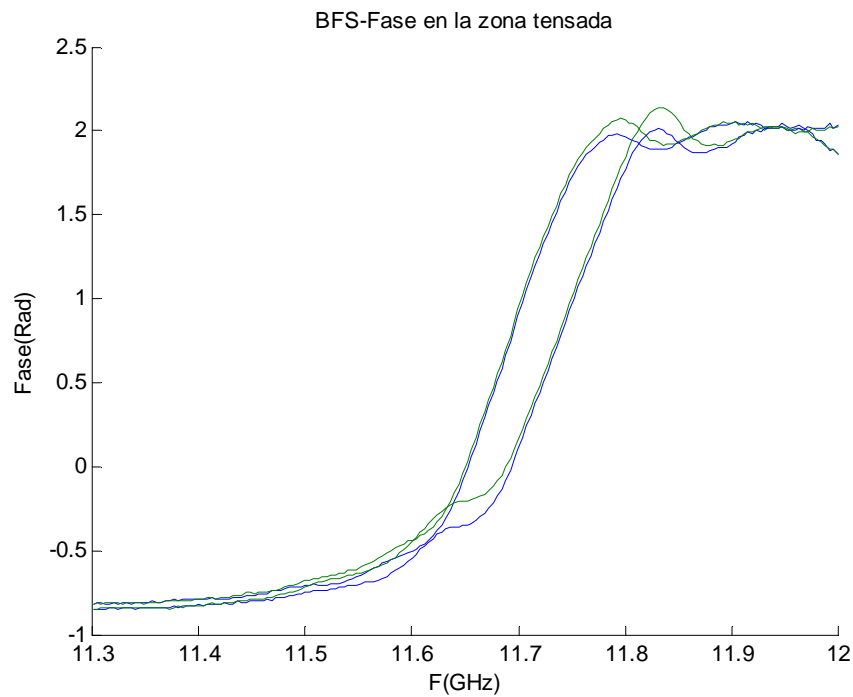


Figura 3.10– Espectro en fase detectado en dos puntos de la fibra en los que se aplica strain, antes y después de ser aplicado. Para un strain de $904,2 \mu\epsilon$.

$$\text{Strain} = 1356,2 \mu\epsilon$$

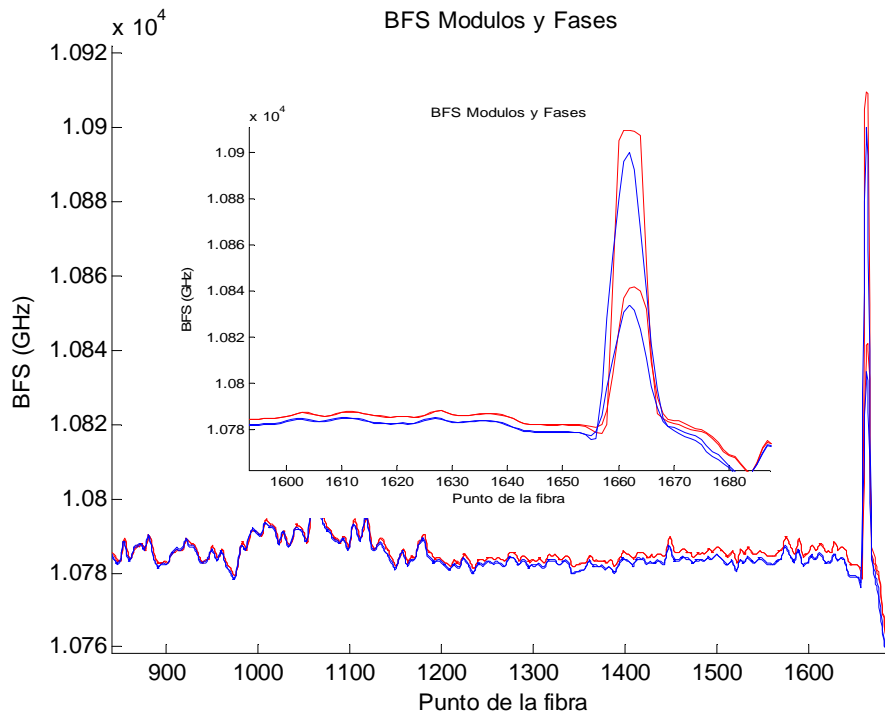


Figura 3.11 - BFS detectados en sensores distribuidos BOTDA tanto en fase (azul) como a partir del módulo (Rojo). Para un strain de 1356,2 $\mu\epsilon$.

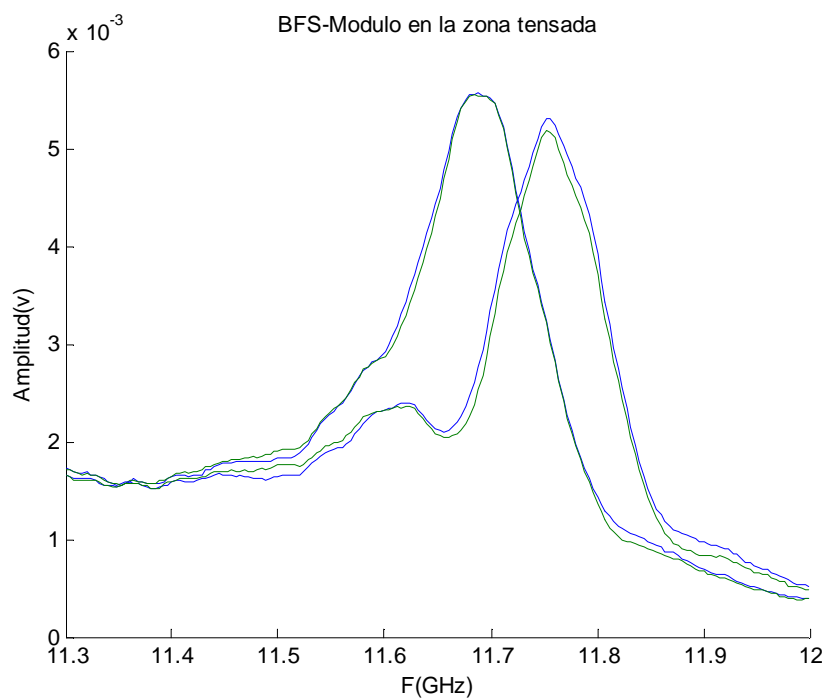


Figura 3.12 - Espectro en módulo detectado en dos puntos de la fibra en los que se aplica strain, antes y después de ser aplicado. Para un strain de 1356,2 $\mu\epsilon$.

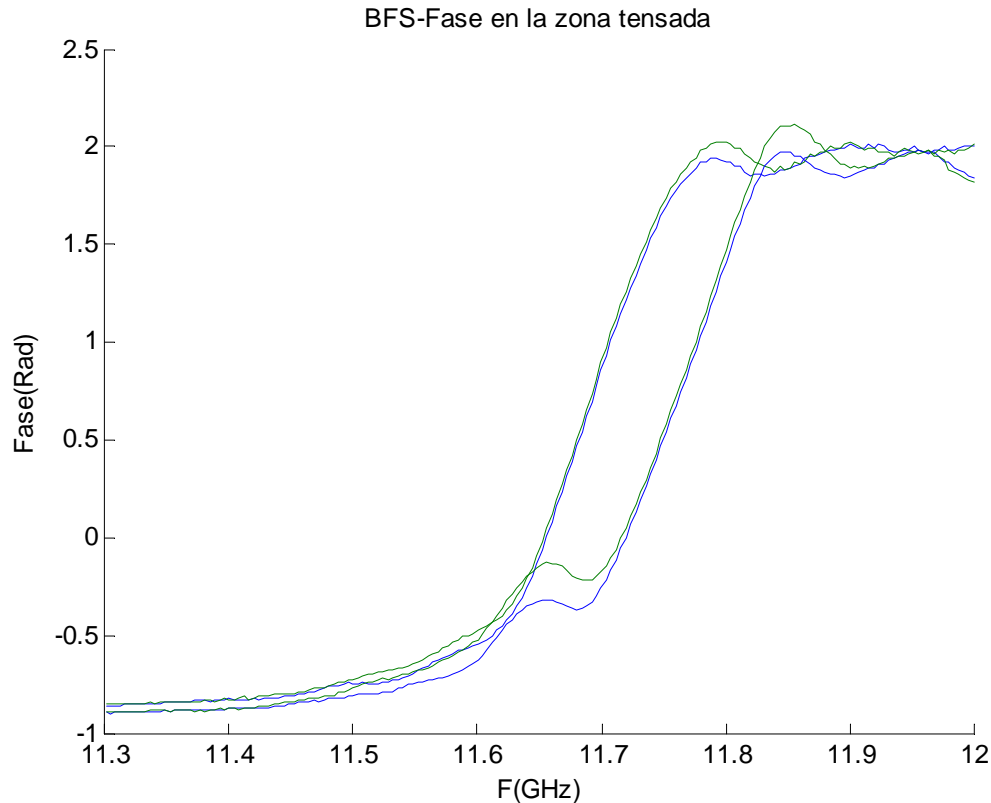


Figura 3.13 - Espectro en fase detectado en dos puntos de la fibra en los que se aplica strain, antes y después de ser aplicado. Para un strain de 1356,2 $\mu\epsilon$.

Al ser esta la medida con mayor strain aplicado, las figuras 3.12 y 3.13 rebelan definitivamente el grado de contaminación de las medidas por interacción Brillouin en dos frecuencias distintas. El espurio se obtiene a 11.63 GHz, dicha frecuencia, es la frecuencia que ofrece, para esta fibra en estado de reposo, máxima amplitud de la traza BOTDA.

La longitud que recorre la luz en la fibra en cierto tiempo es:

$$L = \frac{1}{2} \times (v \times t) = \frac{1}{2} \times \left(\frac{c \times t}{n} \right)$$

para n =índice de refracción de la fibra, t =tiempo y c es la velocidad de la luz en el vacío.

Con la fórmula precedente, se deduce un posible error en la medida. Siendo la precisión del sistema de 103 cm., porque el pulso de medida es de 10 ns aproximadamente. Habiéndose realizado las medidas sobre un tramo de fibra de 110,6 cm. con un índice de refracción de 1,45, y una precisión de 1,6 ns. Los lóbulos indeseados presentes en los espectros de fase así como en los de amplitud podrían ser consecuencia de haberse realizado la medida sobre fibra tensada y fibra fuera de la zona tensada; cuando se quería realizar únicamente sobre fibra tensada. En tal caso, se pueden haber tomado hasta 2cm de fibra de la zona fuera de strain.

A pesar de que las medidas muestran espurios no deseados, se considera que ello no ha afectado a los resultados obtenidos, por lo que se considera que el sistema es resistente a cierta contaminación de las medidas.



Barrido espectral obtenido

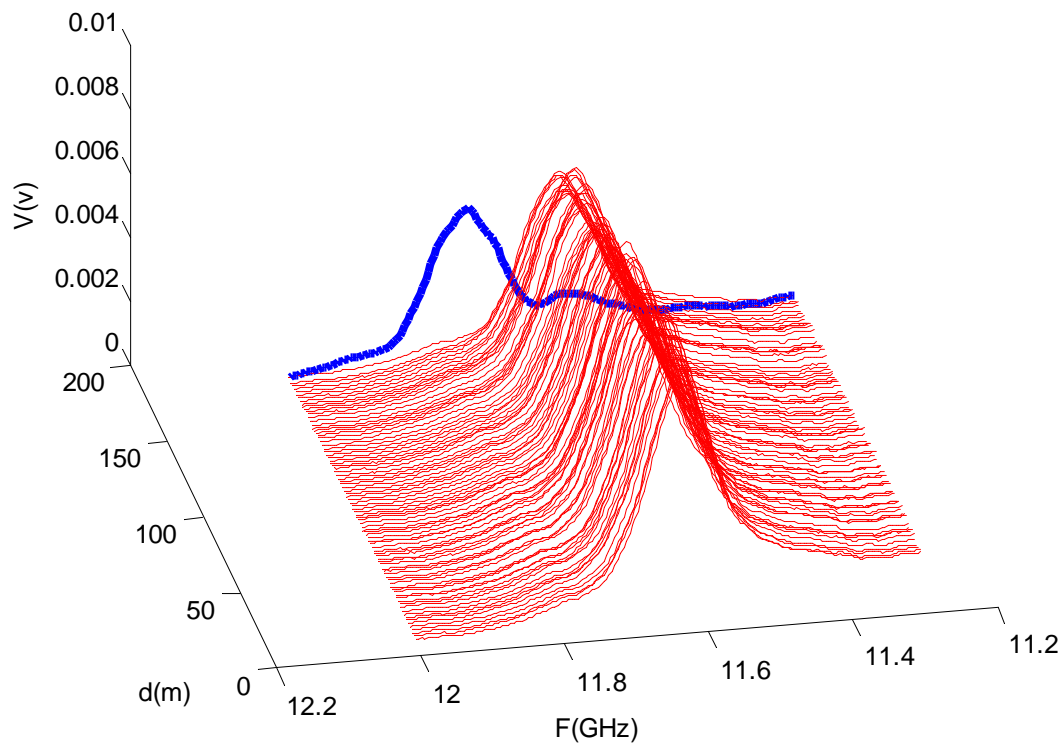


Figura 3.14 - Espectro general de módulo detectado en toda la fibra, el módulo azul es el correspondiente a la zona a la que se aplica un strain de $1356,2 \mu\epsilon$.

Barrido espectral obtenido

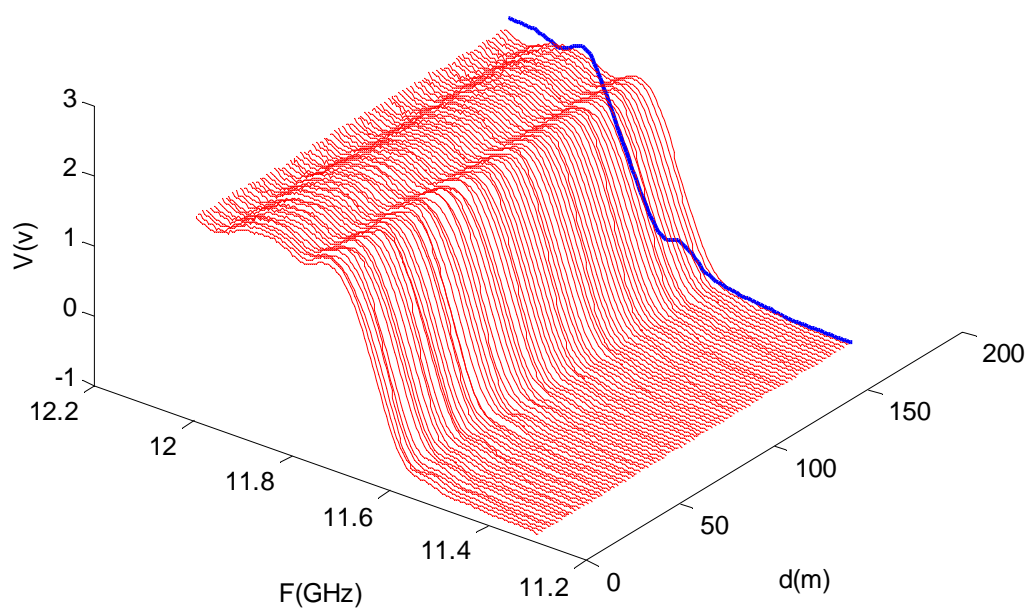


Figura 3.15 - Espectro general de fase detectado en toda la fibra, la fase azul es a correspondiente a la zona a la que se aplica un strain de $1356,2 \mu\epsilon$.

4.- CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos a partir del BOTDA, a partir de su módulo son correctos.
- Los resultados obtenidos a partir del BOTDA, a partir de su fase dan un valor inferior al que corresponde, por lo tanto no son correctos.
- La precisión del sensor (en sus medidas de amplitud), parece ser resistente a espurios separados 2GHz de la frecuencia de mayor interacción Brillouin, de hasta el 40% de su amplitud, como consecuencia del ajuste de la señal medida a una señal ideal.
- Se han detectado errores en los resultados de strain obtenidos con el equipo LUNA Optical Backscatter Reflectometer™, las medidas son correctas en su mayoría pero esporádicamente los resultados se precipitan hacia valores cercanos a cero. No se sabe la causa de dicho error.

Capítulo 4

Estudio de la variación de fase absoluta detectada al aplicar strain a una zona de la fibra.

1.-INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos más novedosos del prototipo en desarrollo es la realización de medidas de deformación unitaria a partir del espectro Brillouin en fase. Sin embargo, el espectro en fase de una zona de la fibra sin deformar, varía al haber un estiramiento en otra zona de la fibra, por el aumento de la longitud de la fibra. Se ha realizado un test para la cuantificación del desfase producido en una fibra óptica a causa del aumento de la longitud de la misma por elongación. Se ha aplicado un strain a una fibra y se ha sentido con el prototipo sensor de fibra óptica distribuidos basados en la técnica de análisis Brillouin óptico en el dominio del tiempo. Para ver únicamente el desfase causado por la elongación de la fibra, se ha sentido en los puntos de la fibra sobre los que no se ha aplicado tensión.

Al realizar medidas de fase mediante el prototipo sensor BOTDA, se ha comprobado que la fase absoluta varía debido a variaciones en la longitud total de la fibra. Esto es lógico –ocurre en todo sistema de comunicaciones- ya que al cambiar la longitud de la fibra, también cambia el tiempo de propagación en la misma y, por lo tanto, la fase absoluta de la señal detectada. El problema en un sistema de medida de *strain* es que el propio *strain* aplicado a una zona de la fibra, modifica la longitud de la misma, por lo que la medida queda “contaminada” por esta variación en la fase absoluta que se mide. La variación de fase ϕ_τ introducida por una variación en la longitud de la fibra S_τ que provoca una variación en el tiempo total τ que la onda tarde en atravesar dicha fibra es:

$$\phi_\tau = 2\pi \cdot f_{RF} \cdot \tau$$

con f_{RF} la frecuencia de modulación de la onda de bombeo. En nuestro caso, estamos trabajando a $f_{RF}=850$ MHz, aunque en el sistema definitivo trabajaremos a 1.3 GHz, con lo que el problema será mayor. La pendiente de la fase de la señal de RF detectada es del orden de los 0.025 rad/MHz, es decir, 0.025 rad/20 $\mu\epsilon$ (en el máximo de pendiente). El retardo equivalente para obtener 0.025 rad es:

$$\tau = \frac{\phi_\tau}{2\pi \cdot f_{RF}} = \frac{0.025}{2\pi \cdot 850\text{MHz}} = 4.68\text{ps}$$

Considerando la velocidad de propagación en la fibra $V_g = c/n$, podemos traducir τ en la longitud equivalente S_τ :

$$S_\tau = V_g \cdot \tau \approx 1\text{mm}$$

Por lo tanto, con la configuración actual, el error introducido en la medida al modificar su longitud en 20 μm es de aproximadamente un 2%:

$$\text{Error} = \frac{20\mu\epsilon}{S_\tau} \approx 2\%$$

En caso de trabajar a 1.3 GHz, el error se incrementará hasta un 3%. Además, este es el error mínimo, ya que está tomado para la zona de máxima pendiente del espectro en fase.

La variación de fase absoluta para una variación en la longitud de la fibra de δ m es:

$$\phi_{\tau} = 2\pi \cdot f_{RF} \cdot \tau = 2\pi \cdot f_{RF} \cdot \frac{\delta}{c/n}$$

En el sistema BOTDA final, habrá que implementar algún tipo de corrección de este hecho. Para ello, se ha pensado en mantener un pequeño tramo de fibra a una temperatura controlada y sin que sufra *strain*. De este modo, la fase medida en ese tramo de fibra puede servir para corregir el cambio total en la fase medida.

En todo caso, primero se pretende medir el efecto de esta variación de la fase absoluta al aplicar *strain* en una zona de la fibra, comprobando que la misma supone un error significativo en la propia medida y que coincide con el cálculo teórico.

Para ello, se empleará el esquema experimental montado para la prueba presente en la figura 1 de este informe. La prueba consiste en medir la fase en una zona de la fibra que no está sujeta a *strain*, cuando se aplica un *strain* controlado sobre 110,6 cm de fibra sujeta con microposicionadores.

2.- DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTO

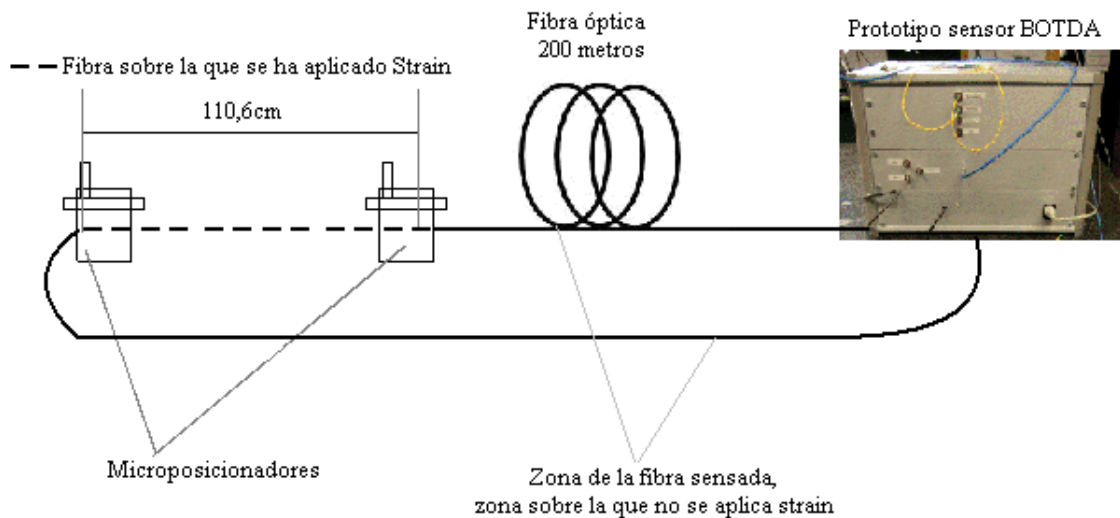


Figura 4.1 – Dispositivo experimental utilizado en la medición.

Se ha utilizado un carrete de fibra óptica. Se ha seleccionado un segmento de dicha fibra y se ha fijado por sus extremos con loctite sobre dos microposicionadores alineados. Una vez fijada la fibra, se han seguido los pasos:

1. Se ha sensado con BOTDA (5 mediciones)
2. Se ha aplicado elongación de XXX μm
3. Se ha sensado con BOTDA (5 mediciones)
4. Se ha colocado el strain en cero.
5. Se vuelve a 1.

Se ha realizado dicho procedimiento para XXX=500, 1000 y 1500.

Una vez realizadas las medidas se han procesado los datos de las mediciones, para obtener un valor representativo de cada medición:



- Se comprueba que el error de las medidas es inferior a la precisión del sistema.
- Se localizan los puntos correspondientes al tramo de fibra sujeto entre los microposicionadores. Se descartan dichos puntos para el procesado
- Se calcula el desfase del espectro (entre 11,55 y 11.62 GHz) de cada punto de la fibra. Véanse figuras 4.2, 4.4 y 4.6.
- Se comparan los BFS obtenidos de las medidas 1 y 3, para cada strain aplicado a la fibra. Se obtiene un valor que expresa la variación de BFS (MHz) entre las dos medidas.
- Se realiza un promediado de los puntos seleccionados en correspondientes al tramo de fibra sujeto entre los microposicionadores.
- Una variación de 1MHz corresponde a una variación de 20 μ s. Se multiplica el valor obtenido por 20 y se obtiene un valor de strain.

3.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se han obtenido los siguientes resultados:

Elongación (μ m)	Desfase medido (rad)				Desfase Calculado (rad)
	Zona anterior al strain		Zona posterior al strain		
	Media	Mediana	Media	Mediana	
500	0.0139	0.0132	0.0171	0.0171	0.0125
1000	0.0243	0.0247	0.0323	0.0311	0.0249
1500	0.0329	0.0335	0.0403	0.0400	0.0374

TABLA 1. Resumen de los resultados obtenidos

Como se aprecia en la tabla 1, los valores medidos se corresponden a los predichos (mediante el método expuesto en la introducción) en el caso de medir la fase en la zona posterior al strain. En la zona anterior a la zona de strain, los valores medidos tienen una tendencia coherente con el strain aplicado aunque el desfase es diferente al de la zona posterior a la zona de strain. Nótese que la zona anterior al strain estaba enrollada mientras que la zona posterior al strain estaba extendida en el momento de la medición.

Se han calculado los valores con dos métodos distintos: promediando y también con la mediana, ya que la colección valores de desfase obtenidos para cada elongación (véanse figuras 2, 4 y 6) puede estar mejor aproximada a un valor mediante la mediana que con un promediado simple.

Puede verse gráficamente el aumento de desfase al aumentar el strain en las gráficas 3 ,5 y 7, en la zona de los 11,7 GHz. El Desfase se ha medido entre 11.55 y 11.62 GHz.

500 μm

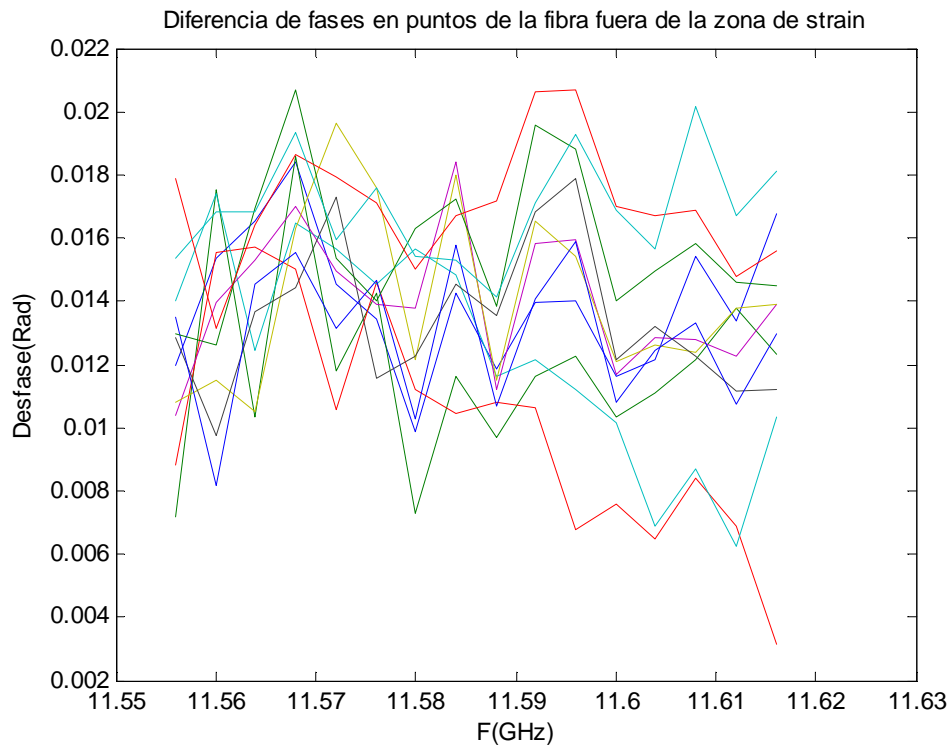


Figura 4.2 – Desfase en los puntos de la fibra posterior a la zona de strain, antes y después de ser aplicado entre 11,55 y 11.62 GHz. Para una elongación de 500 μm .

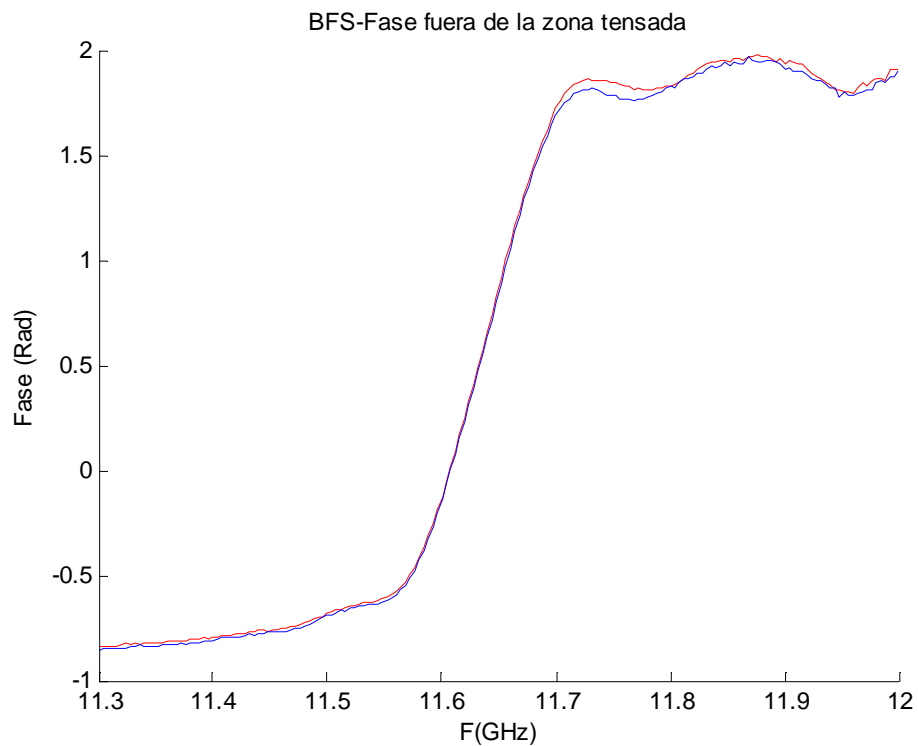


Figura 4.3– Espectro en fase detectado en un punto de la fibra en la que no se aplica strain, antes (rojo) y después de ser aplicado (azul). Para una elongación de 500 μm .

1000 μm

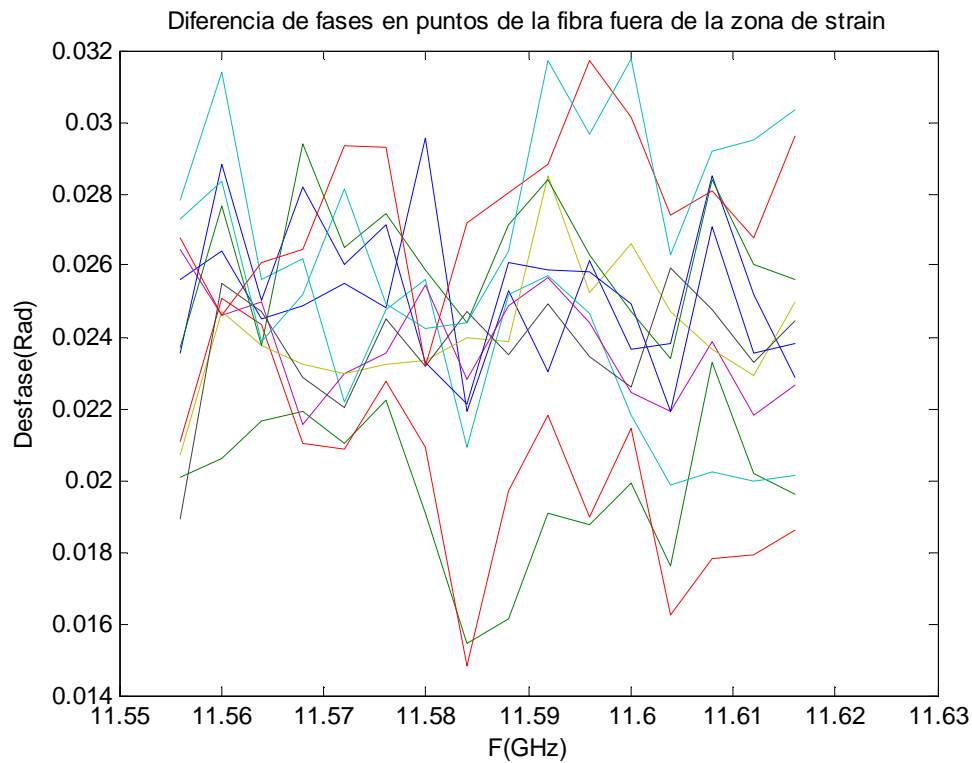


Figura 4. 4 – Desfase en los puntos de la fibra posterior a la zona de strain, antes y después de ser aplicado entre 11,55 y 11,62 GHz. Para una elongación de 1000 μm .

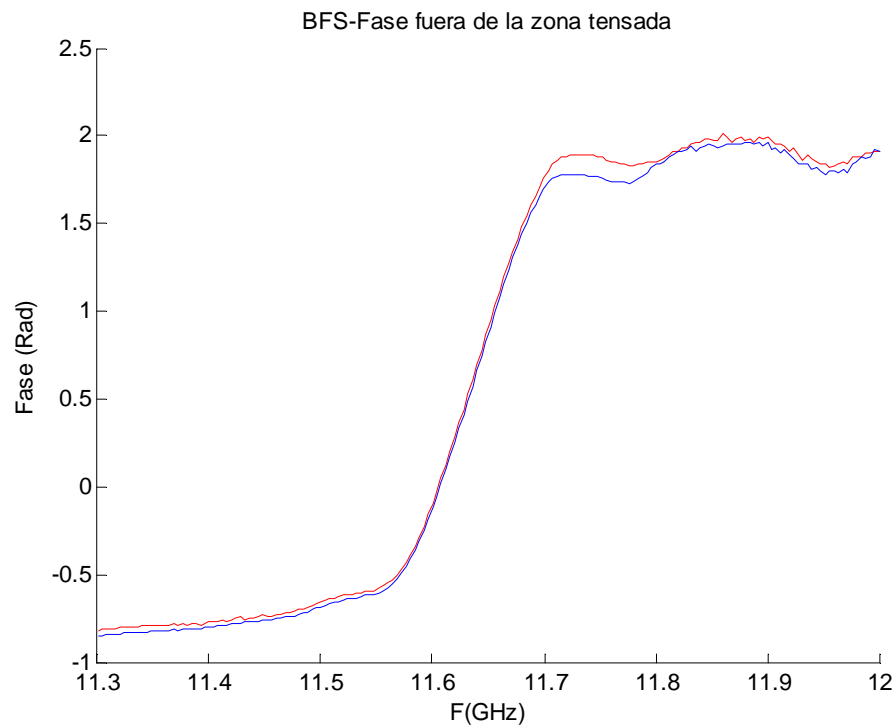


Figura 4.5 – Espectro en fase detectado en un punto de la fibra en la que no se aplica strain, antes (rojo) y después de ser aplicado (azul). Para una elongación de 1000 μm .

1500 μm

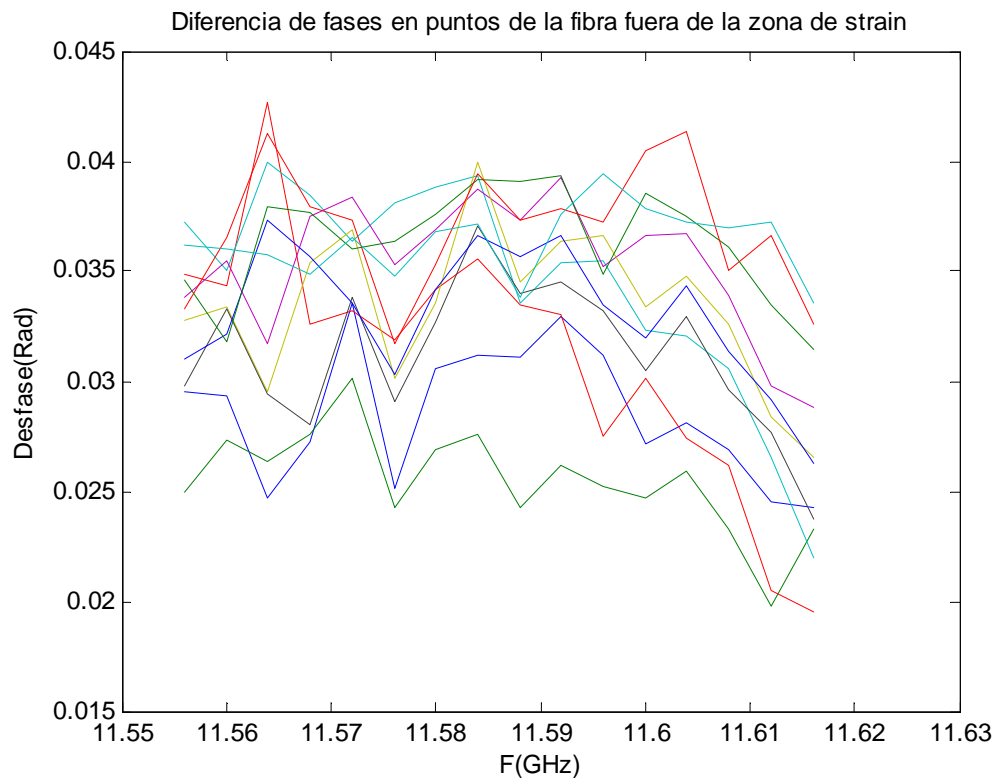


Figura 4.6– Desfase en los puntos de la fibra posterior a la zona de strain, antes y después de ser aplicado entre 11,55 y 11,62 GHz. Para una elongación de 1500 μm .

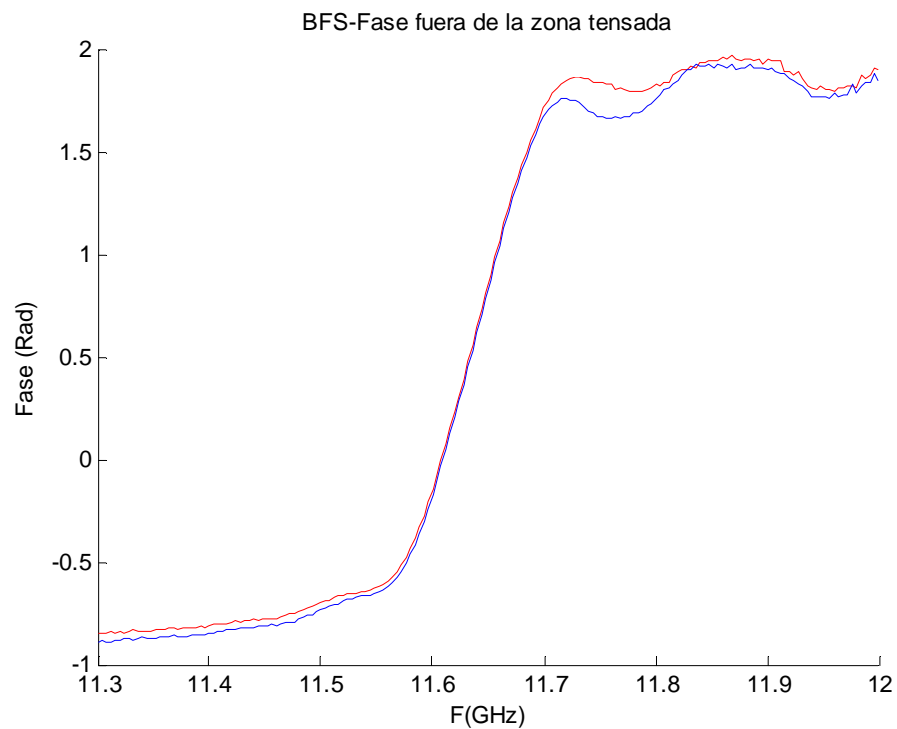


Figura 4.7– Espectro en fase detectado en un punto de la fibra en la que no se aplica strain, antes (rojo) y después de ser aplicado (azul). Para una elongación de 1500 μm .



4.-CONCLUSIÓN

- Los valores obtenidos son aproximados a los predichos.
- Los valores obtenidos en ciertas zonas de la fibra son muy aproximados a los valores predichos matemáticamente, sin embargo los valores medidos en otras zonas de la fibra no lo son. Además se considera que los valores medidos no son representativos por la amplia dispersión en las medidas véanse figuras (4.2, 4.4 y 4.6).

Capítulo 5

Estudio de la ortogonalidad obtenida con el módulo DGD en función de la longitud de onda.

1.-INTRODUCCIÓN:

Una de las mejoras que se pretende introducir al sensor BOTDA es el empleo de ondas de bombeo ortogonales en la modulación ODSB-SC. Para ello, se emplean módulos de retardo diferencial de grupo (DGD) de la casa Phoenix Photonics¹. Para ello, la onda de bombeo debe ser modulada a 11 GHz o 9.6GHz, frecuencia sobre la cual se conseguiría una completa ortogonalización de los dos campos, ya que los módulos DGD tienen un DGD de 23ps y 26ps respectivamente.

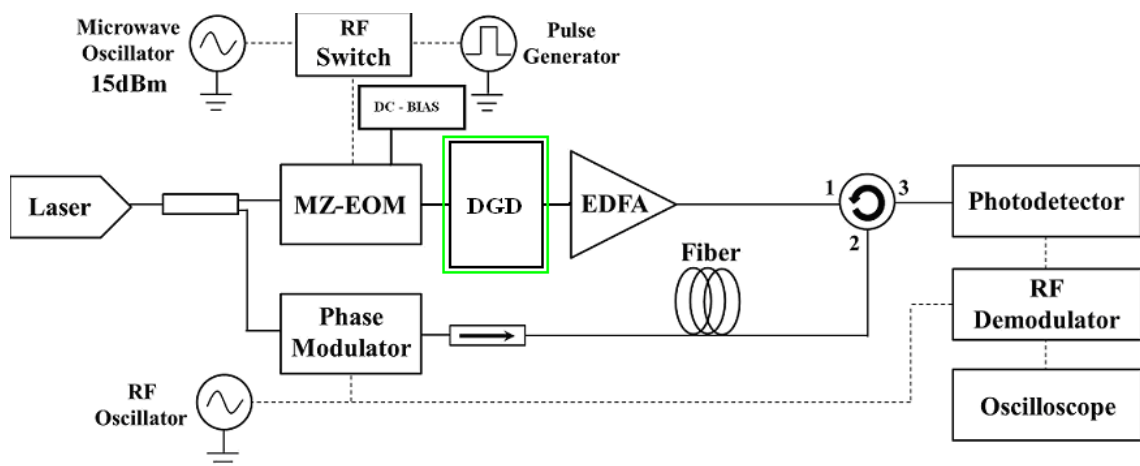


Figura 5.1. Situación del DGD (verde) en el esquema general del prototipo sensor BOTDA desarrollado en el Departamento de ingeniería eléctrica y electrónica de la UPNA.

Lo anterior se debe a que el retardo diferencial de grupo $\Delta\tau$ proporcionado por un medio birrefringente para que dos campos ópticos separados en frecuencia por $\Delta\nu$ a la entrada del mismo tengan estados de polarización ortogonales a su salida ha de ser:

$$\Delta\tau = \frac{1}{2 \cdot \Delta\nu}$$

Por ejemplo, si $\Delta\nu$ es igual a 22GHz (11GHz de frecuencia de modulación), esto nos da un $\Delta\tau$ de 22.7ps.

Sin embargo, se ha comprobado que el módulo DGD DGD-L-15-23-PT-2 no ortogonaliza perfectamente. Esto puede ser debido a varios factores.

- El primero es que la longitud de onda de trabajo del mismo es 1550nm en lugar de los 1600nm en los que se está empleando.
- El segundo es que está optimizado para una separación de las ondas a ortogonalizar de 22GHz, y se está empleando en la franja de 11.3GHz a 12GHz.

¹ Módulos DGD Phoenix Photonics LabFot100512 (optimizado a 11 GHz) y LabFot100523 (optimizado a 9.61 GHz)

5. Estudio de la ortogonalidad obtenida con el módulo DGD

En principio, el módulo DGD DGD15-23-PT-2 debería solucionar ambos problemas, ya que está optimizado para 1550nm y para una frecuencia de modulación de 9.61GHz que es la que se empleará en el diseño final del sensor de fibra óptica distribuido basado en la técnica de análisis Brillouin óptico en el dominio del tiempo.

Se propone estudiar la ortogonalización de las ondas de bombeo que se obtiene en función de la longitud de onda y la frecuencia de modulación de la onda de prueba y para ambos módulos DGD. Para ello, se seguirá un procedimiento similar al empleado en el informe “2011_08_06 experimental setup DGD orthogonal pump con graficos.ppt” y que se describe gráficamente en la figura 5.2.

Los objetivos concretos de estas pruebas son:

- Medir la frecuencia de modulación del modulador ODSB-SC óptima para los módulos DGD.
- Comprobar el grado de ortogonalidad que se obtiene con estos módulos para diferentes frecuencias de modulación. Para determinar el grado de ortogonalidad, se empleará un método similar al utilizado por Javier Urricelqui² en su estudio del 2012-02-05.
- Comprobar el grado de degradación de las prestaciones de los módulos en función de la longitud de onda.

2.-DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y MÉTODO OPERATIVO:

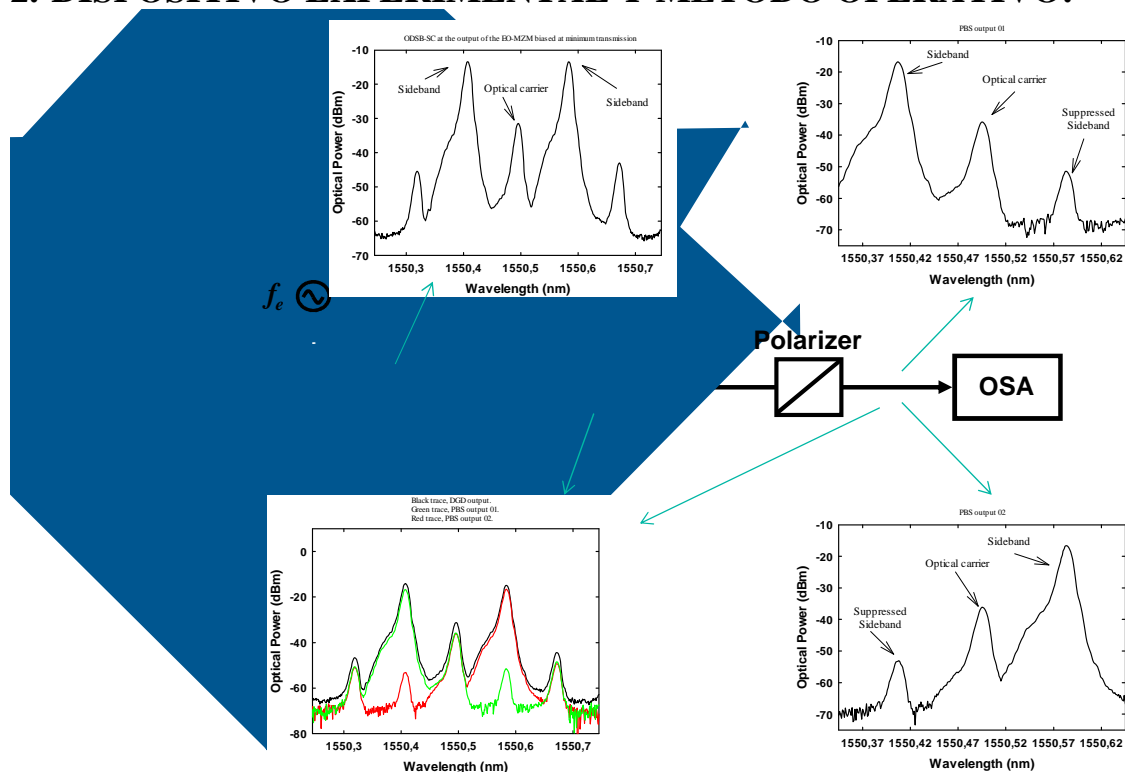


Figura 5.2. Esquema general del dispositivo experimental

² 2012_02_05_Medidas_DGD_scrambler.docx

Una vez montado el esquema de la figura 5.2, se han seguido los siguientes pasos:

1. Se ha encendido el láser Santec con una potencia de 10dBm.
2. Se conecta el generador de radiofrecuencia ROHDE con una potencia de 15dB (a 11GHz en el caso del modelo DGDL-15-23-PT-2 y a 9,61 GHz en el caso del modelo DGDL-15-26-PT-2).
3. Se aplica voltaje al DC-BIAS del modulador, se busca el punto de mínima transferencia y se deja 2 horas para la estabilización del sistema.
4. Una vez estabilizado el sistema, se varía la frecuencia de modulación (entre 8GHz y 13GHz en el caso del modelo DGDL-15-23-PT-2. Entre 9GHz y 10GHz en el caso del modelo DGDL-15-26-PT-2.). Se busca el punto de mayor ortogonalidad con la ayuda del control de polarización y se captura la señal obtenida a la salida de una de las ramas del polarizador.
5. Una vez realizado el barrido en la frecuencia de modulación, se realiza un nuevo barrido variando la longitud de onda de la portadora óptica (para longitudes de onda de 1520nm 1550nm y 1580nm). El procedimiento es similar al descrito en el punto 4, salvo que la frecuencia de modulación permanece fija (11GHz en el caso del modelo DGDL-15-23-PT-2 y a 9,61 GHz en el caso del modelo DGDL-15-26-PT-2) y para cada longitud de onda se calibra el punto de mínima transferencia del modulador.

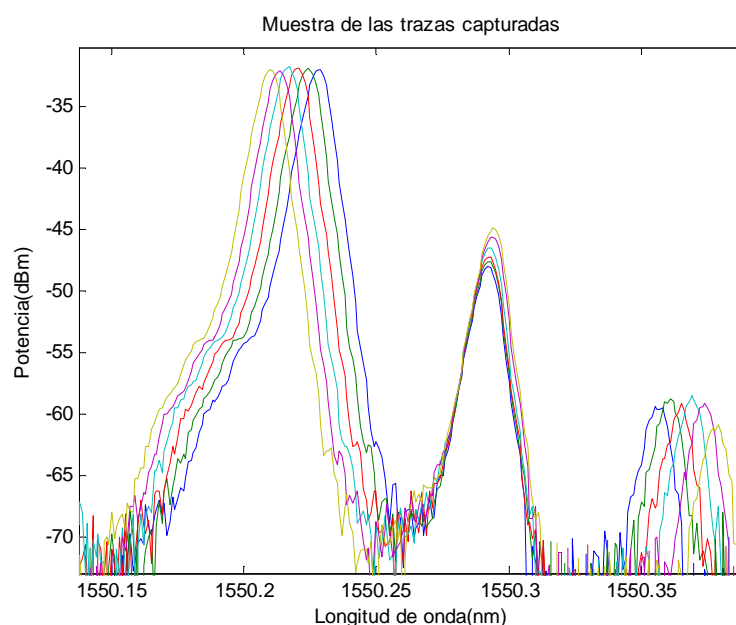


Figura 5.3. Señal capturada a la salida del polarizador para distintas frecuencias de modulación.

3.-ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:

A continuación se muestran los resultados obtenidos con cada módulo DGD. En ellos se puede apreciar la supresión de banda lateral proporcionada por cada módulo en función de la frecuencia de modulación, y de la longitud de onda de la portadora. De ello se deducirá el grado de ortogonalidad de cada módulo para distintas frecuencias de modulación y distintas longitudes de onda de portadora.

DIFERENTIAL GROUP DELAY LINE DGD-15-23-PT-2

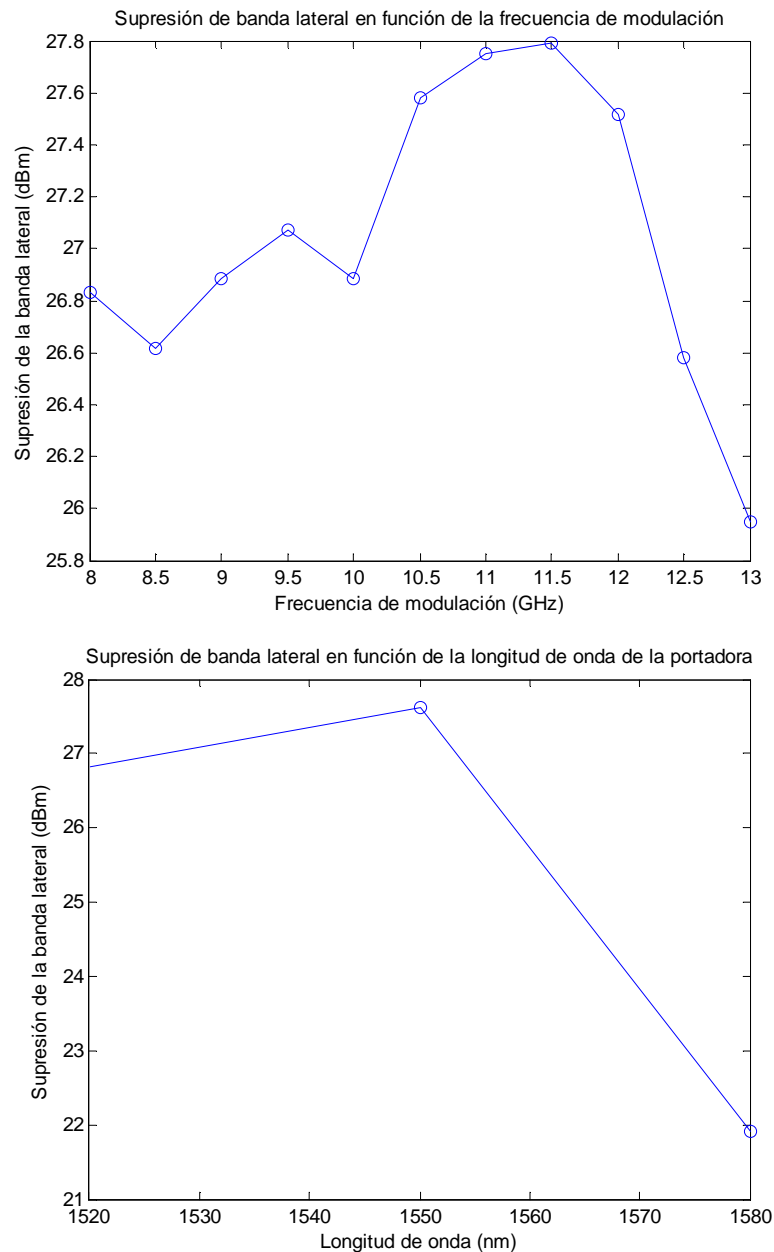


Figura 5.4. Supresión obtenida con el DGD-15-23-PT-2 variando la frecuencia de la moduladora (superior) y variando la longitud de onda de la portadora (inferior).

Como se ve en la figura 5.4 la mayor ortogonalidad con el modelo DGD-15-23-PT-2 se ha obtenido para una longitud de onda de la portadora óptica de 1550 nm y una

frecuencia de modulación de 11.5GHz.

Al separar la frecuencia de modulación del punto óptimo de ortogonalización del DGD DGDL-15-23-PT-2 , hasta 3GHz, con una portadora a 1550nm, la supresión disminuye 2dBm. Al separar la longitud de onda de la portadora del punto óptimo de ortogonalización del DGD DGDL-15-23-PT-2 , hasta 30nm, con una portadora a 1550nm, la supresión disminuye 6dBm.

DIFFERENTIAL GROUP DELAY LINE DGDL-15-26-PT-2

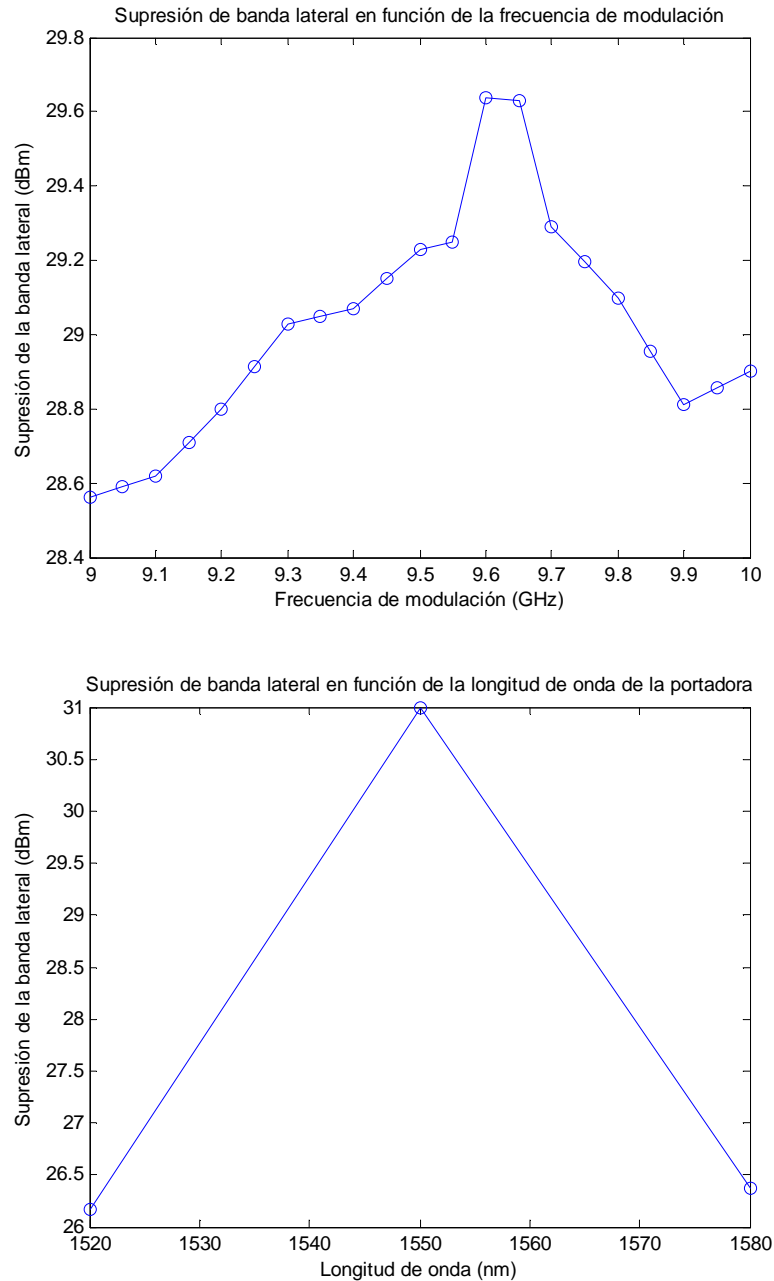


Figura 5.5. Supresión obtenida con el DGDL-15-26-PT-2 variando la frecuencia de la moduladora (superior) y variando la longitud de onda de la portadora (inferior).

La mayor ortogonalidad con el modelo DGDL-15-26-PT-2 se ha obtenido para una

5. Estudio de la ortogonalidad obtenida con el módulo DGD

longitud de onda de la portadora óptica de 1550 nm y una frecuencia de modulación de 9.6 GHz.

Al separar la frecuencia de modulación del punto óptimo de ortogonalización del DGD DGDL-15-26-PT-2 , hasta 0'6 GHz, con una portadora a 1550nm, la supresión disminuye 1dBm. Al separar la longitud de onda de la portadora del punto óptimo de ortogonalización del DGD DGDL-15-26-PT-2 , hasta 30nm, con una portadora a 1550nm, la supresión disminuye 5dBm.

El hecho de variar la longitud de onda de la portadora o la frecuencia de modulación óptima, ya mencionadas para cada modelo de DGD, hace que la supresión de la banda lateral disminuya y con ello disminuya la ortogonalidad proporcionada con el módulo de retardo diferencial de grupo.

Señalar que la supresión obtenida en distintos momentos no ha sido la misma, aun así, la tendencia de las curvas que muestran las figuras 5.4 y 5.5 sí que son las mismas en los distintos momentos, pero no sus valores. Aunque no se sabe la causa concreta de este fenómeno, puede deberse a la búsqueda manual del punto de polarización del modulador electro-óptico con un controlador de polarización, ya que no es tan precisa como para llegar al mismo punto en dos mediciones distintas.

4.-CONCLUSIONES:

- Las frecuencias en las que se ha conseguido mayor ortogonalidad con los módulos de retardo diferencial de grupo se corresponde con las calculadas a partir de sus tiempos de retardo, como se muestra en la introducción.
- El módulo DGDL-15-26-PT-2 aporta una mayor supresión que el DGDL-15-23-PT-2. Por ello se consigue una mayor ortogonalidad, por lo tanto es más adecuado para utilizarlo en el diseño final del prototipo sensor BOTDA.
- El módulo DGDL-15-23-PT-2 es más estable que el DGDL-15-26-PT-2 cuando funciona en longitudes de onda alejadas de su punto óptimo de trabajo. Por eso, para las frecuencias de trabajo actuales es más correcto utilizar el módulo DGDL-15-23-PT-2.

Capítulo 6

Puesta a punto del preamplificador SR445A DC-350 MHz.

1.-INTRODUCCIÓN

En el caso de realizar cierto tipo de medidas, como las medidas “long range”, el proceso de medición se utiliza el osciloscopio Picoscope, el cual, por sus características técnicas precisa de un preamplificador. El preamplificador SR445A³ de 350 MHz de ancho de banda y acoplado a DC se emplea en el sensor de fibra óptica basado en el análisis Brillouin óptico en el dominio el tiempo, para amplificar la señal eléctrica a la salida del fotodetector. Este preamplificador es totalmente indispensable en caso de emplear el osciloscopio PicoScope 5000, ya que este solo tiene una precisión de 8 bits y un rango mínimo de señal de 200 mv.

El en manual de este instrumento se indican los pasos a dar para realizar una correcta calibración del mismo, en tres aspectos clave:

- I. Compensación de alta frecuencia
- II. Calibración del offset
- III. Calibración de la ganancia

Por lo tanto, el objetivo en este sentido es comprender el modo en que se realiza esta calibración y realizarla con garantías. Para ello habrá que proponer un método de calibración alternativo al propuesto en el manual del dispositivo, ya que no se dispone de los equipos especificados en dicho manual.

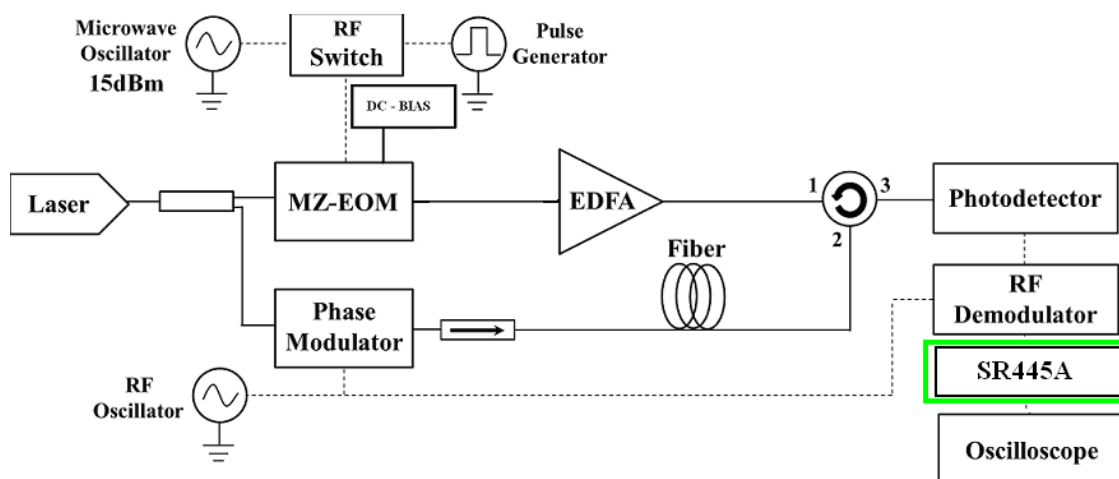


Figura 5.1. Situación del preamplificador SR445 DC-350 MHz (verde) en el esquema general del prototipo sensor BOTDA desarrollado en el Departamento de ingeniería eléctrica y electrónica de la UPNA.

³ SR445A LabFot100516, <http://www.thinksrs.com/products/SR445A.htm>

2.-DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y MÉTODO OPERATIVO

A tener en cuenta:

- **Nunca aplicar a ninguna de las entradas del preamplificador una señal con amplitud mayor a 200mV pp.**
- **El ajuste** de los distintos parámetros se hace **mediante potenciómetros** situados en la parte inferior del preamplificador SR445A de cada canal. Véase figura 6.2.



Figura 6.2. Potenciómetros para el ajuste de ganancia, offset y compensación de alta frecuencia del canal 1.

2.1 Compensación de alta frecuencia:

Con un generador de señales y un generador de pulsos⁴ se genera un pulso que cumpla las siguientes especificaciones:

1. Tiempo de subida inferior a 1ns.
2. Amplitud de 100mV o lo más aproximada posible.

Dicho pulso se visualiza en un canal del osciloscopio a la vez que se envía a la entrada del canal 1 del preamplificador SR445A. (Antes de entrar al preamplificador se coloca un atenuador de -20dB.)

El osciloscopio debe tener un ancho de banda inferior a 350MHz ya que este es el ancho de banda del preamplificador.

El montaje realizado para esta calibración se ha realizado adaptado a los equipos disponibles y es el mostrado en la figura 6.3.

⁴ Generador de pulsos: *Prototipo1 DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA LA FABRICACIÓN Y ENSAYO DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS*, Adrian Zudaire.

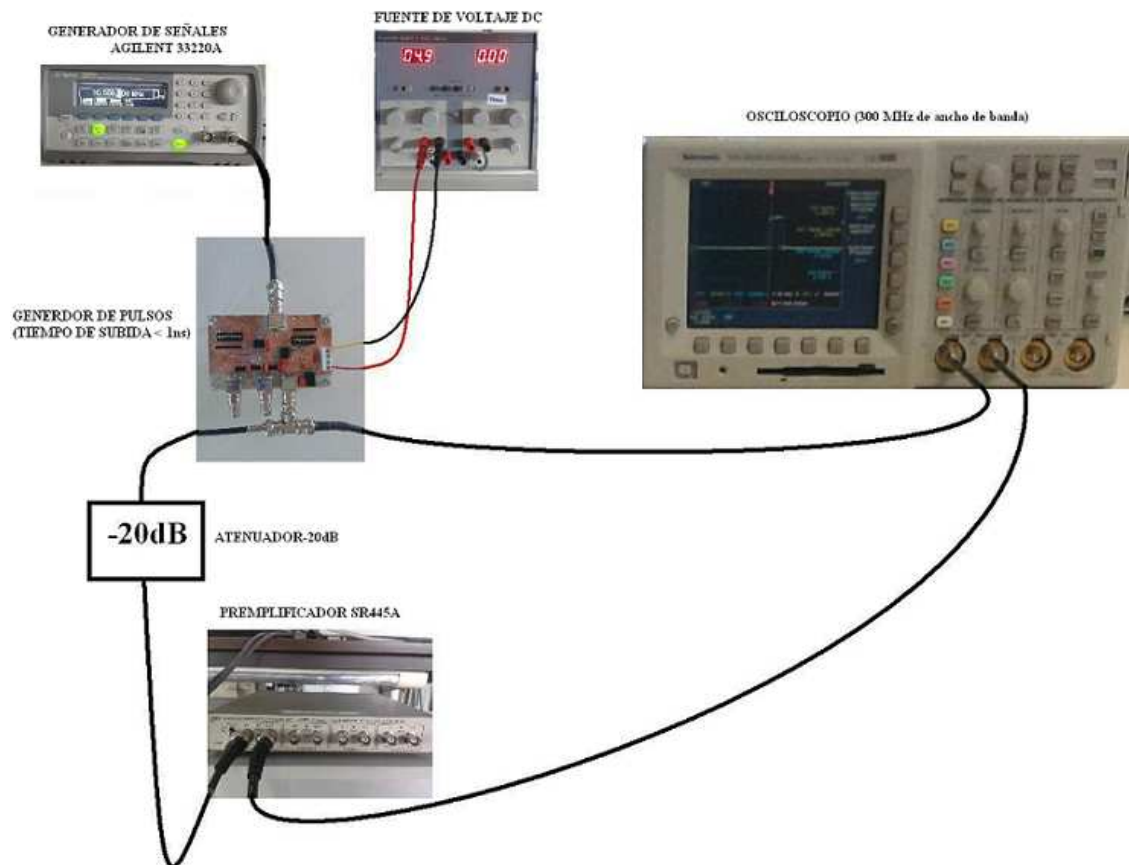


Figura 6.3. Montaje empleado para realizar la compensación de alta frecuencia.

Ajustando el potenciómetro (Channel 1 HF. COMP, véase figura 6.2) hay que hacer coincidir lo máximo posible:

1. El **tiempo de subida** del pulso entregado por el preamplificador SR445A con el **tiempo de subida** del pulso original.
2. El **sobre-impulso** del pulso entregado por el preamplificador SR445A con el **sobre-impulso** del pulso original.

Sin embargo, si se ajusta el tiempo de subida se desajusta el sobre-impulso y viceversa, llegando a las situaciones captadas en la figura 6.4. Así hay que llegar a una situación intermedia entre el ajuste del sobre-impulso y el ajuste del tiempo de subida como se muestra en la figura 6.5.

6. Puesta a punto del preamplificador SR445A DC-350 MHz.

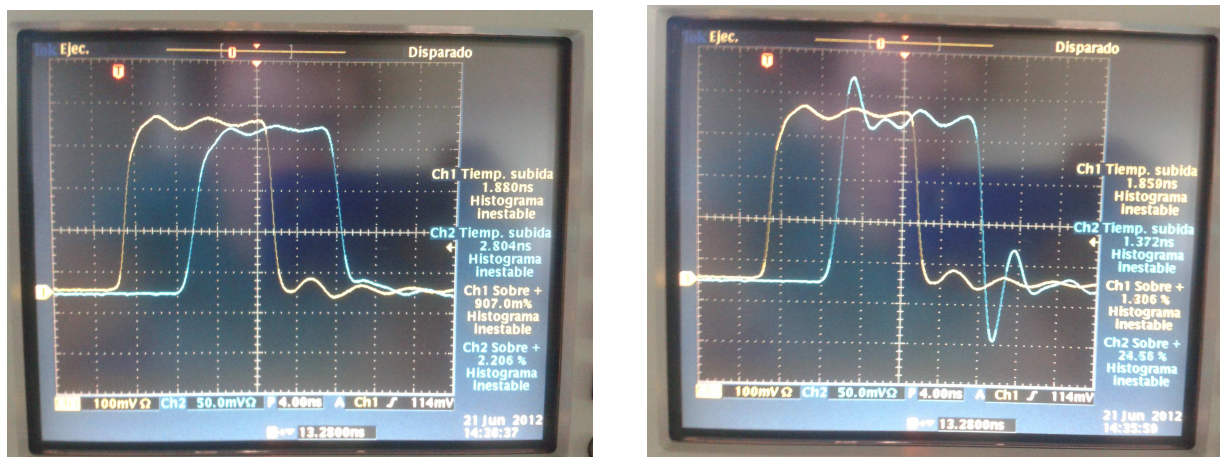


Figura 6.4. Situaciones de compensación de alta frecuencia, con el sobre-impulso ajustado (izquierda) y con el tiempo de subida ajustado (derecha).

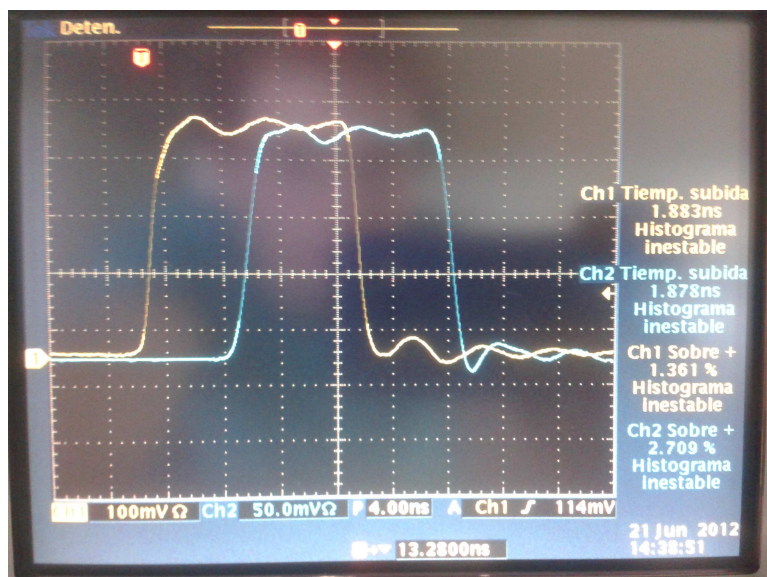


Figura 6.5. Situación de compensación de alta frecuencia ajustada.

Por lo tanto, hay que buscar una situación intermedia en la que tanto el sobreimpulso como el tiempo de subida del pulso a la salida del amplificador, se aproximen al del pulso original (véase figura 6.5).

Una vez realizada la compensación de alta frecuencia del canal 1, se repite el proceso para los canales 2, 3 y 4 del preamplificador SR445A.

2.2 Calibración del offset:

El offset se ve modificado al realizar la compensación de alta frecuencia, por ello se realiza un ajuste para llevar el offset a 0v. Para ello:

1. Se deja la entrada del canal a calibrar inconexa, al aire.
2. Se conecta en la salida un multímetro que mida el Voltaje DC.
3. Se ajusta dicho voltaje a 0v mediante el potenciómetro OFFSET (véase figura 6.2) del canal correspondiente (véase figura 6.5).
4. Se coloca una carga de 50Ω en la entrada (véase figura 6.5).
5. Se verifica que el voltaje desciende menos de 2,5mV.
6. Se repite el procedimiento para todos los canales del preamplificador.

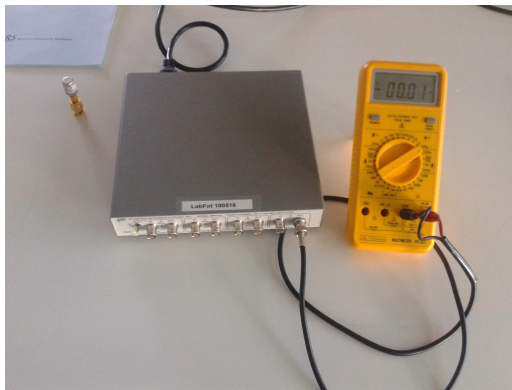


Figura 6.6. Montaje empleado para realizar la calibración del offset, ajuste del voltaje a zero (izquierda) y comprobación de descenso del voltaje (derecha).

2.3 Calibración de la ganancia:

Una vez anulado el offset, se realiza un calibrado de la ganancia. Este consiste en verificar que la ganancia es 10x para una salida sin carga, que para la salida con una carga de 50Ω será de 5x (+14dB). Conocida las impedancias de entrada y de salida de 50Ω , al hacer pasar una corriente de 1mA por la entrada esta dará lugar a un voltaje de 50mV en la entrada, el cual, será amplificado en la salida a 500mV, dando lugar a una impedancia de salida de 500Ω .

El procedimiento es el siguiente:

1. Se coloca una resistencia de 220Ω en serie con la entrada (esto es para que caiga tensión proveniente de la fuente de voltaje antes de la entrada ya que en la entrada queremos de haya una diferencia de potencial de 50mV para tener 1mA de intensidad de corriente). Para una posterior réplica del proceso realizado, esta resistencia se pega en la parte inferior del equipo.
2. Se regula el voltaje de la fuente hasta que la corriente que pase por la entrada del preamplificador SR445A sea de 1mA. Si se ha colocado la resistencia del primer paso este voltaje será de 370mV, si no será 50mV. Véase figura 6.7.
3. Se mide la impedancia de salida con un multímetro. Se ajusta dicha impedancia a 500Ω con el potenciómetro GAIN (véase figura 6.2) del canal correspondiente.
4. Una vez ajustada la ganancia se comprueba que el offset sigue siendo nulo.
5. Se repite el proceso para todos los canales.

6. Puesta a punto del preamplificador SR445A DC-350 MHz.

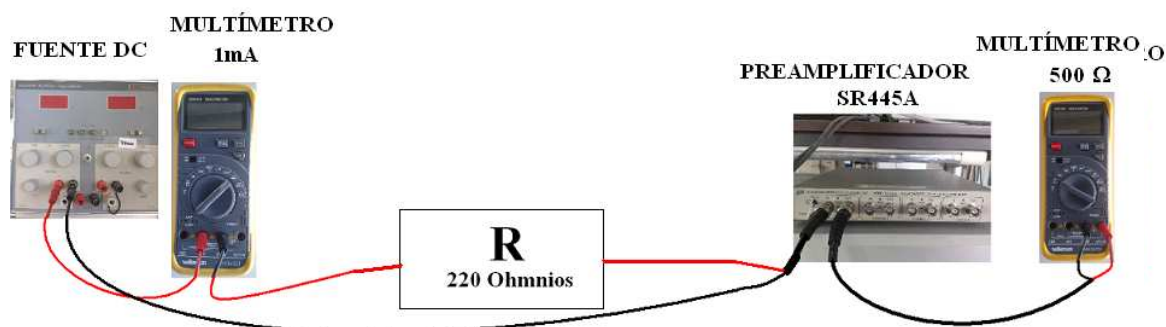


Figura 6.7. Montaje empleado para realizar la calibración de la ganancia.

3.-ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para comprobar la fiabilidad de la calibración se han capturado varias trazas de señales conocidas, pasando y sin pasar por el preamplificador SR445A. El resultado se muestra en la figura 6.8.

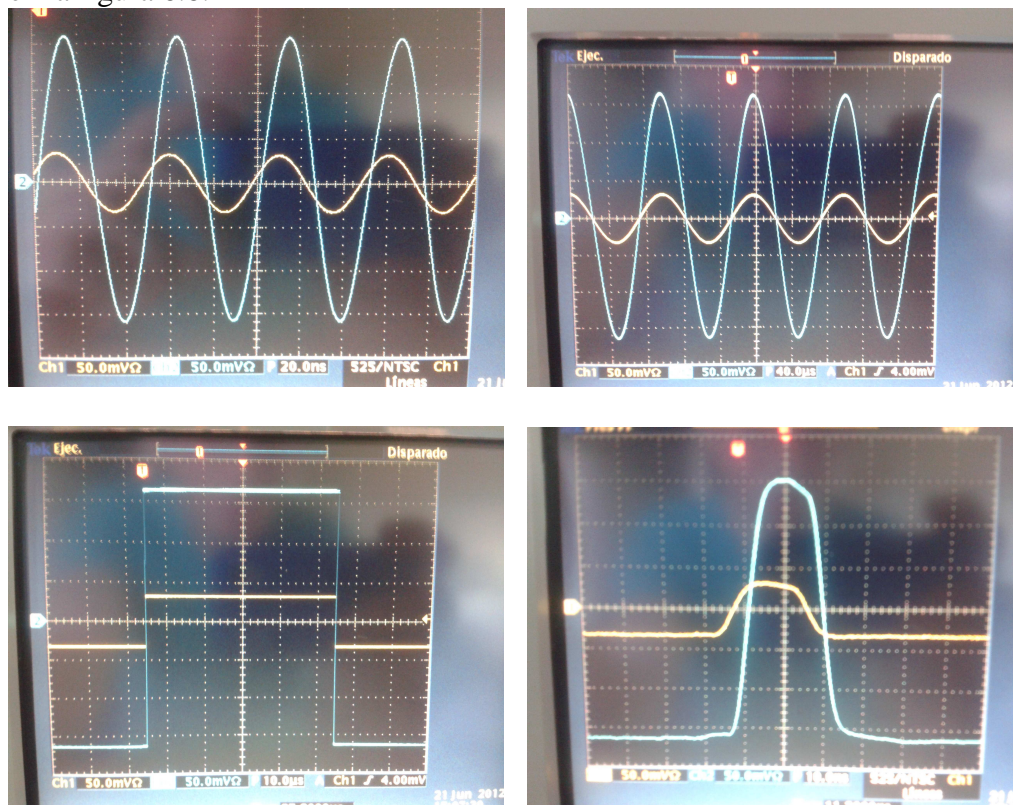


Figura 6.8. Captura de señales sin amplificar (amarillo) y señales amplificadas (azul).

Las señales amplificadas se han amplificado 5x, tienen un offset nulo y la forma de onda es muy parecida a la forma de onda de las señales originales, por lo tanto, se considera que el método de calibración propuesto en este informe funciona correctamente.

4.-CONCLUSIÓN

- Se puede realizar una correcta calibración del preamplificador SR445A utilizando otros equipos distintos de los especificados en el manual del dispositivo.
- El método de puesta a punto del preamplificador SR445A propuesto en este informe funciona correctamente.

Capítulo 7

Metodología de medida con el prototipo sistema sensor BOTDA.

Se va a describir la metodología del sensor BOTDA, aquí quedan detallados los pasos para encender el prototipo y los dispositivos que, hasta el momento, lo acompañan. Una vez encendidos todos los elementos, se prepara el sistema para el sensado, se mide y se apaga el sistema sensor. A continuación se describen los pasos a seguir en el orden mencionado.

1.-ENCENDIDO Y PUESTA A PUNTO:

El primer paso es encender los equipos a utilizar:

1. Encender PC
2. Comprobar que están conectados al PC :
 - a. Cable de Red proveniente del ROHDE & Schwarz
 - b. Cable GPIB-USB proveniente del Osciloscopio
 - c. Cable USB proveniente de la caja BOTDA.
3. Encender Tektronix TDS5104B o en su caso el osciloscopio que se vaya a utilizar.
4. Encender Rohde & schwarz SMF 100A o en su caso el generador de RF que se vaya a utilizar.
5. Enchufar la caja BOTDA.
6. Desconectar la fibra que está conectada al frontal de la caja, donde se puede leer Photodetector.
7. Conectar dicha fibra al medidor de potencia óptica EXFO o en su caso al que se disponga.
8. Encender controlador de láser ILX Lightwave.



Figura 7.1.- ILX Lightwave

- a. Ajustar Resistencia al valor que se desee (en este momento 10K Ω)
 - i. Pulsar botón TEC (1) del cuadro de ajuste (se encenderá el piloto inmediatamente superior a dicho botón).
 - ii. Una vez encendido el piloto, la ruleta controla la resistencia del controlador, girar dicha ruleta hasta alcanzar el valor deseado.

- iii. Una vez alcanzado el valor de resistencia deseado, vuelva a pulsar el botón TEC (1) y cerciórese de que el piloto queda apagado.
- iv. Pulse Output (3) en el cuadro de ajuste del TEC MODE. Su correspondiente piloto deberá quedar encendido.
- b. Ajustar Intensidad al valor que se desee (en este momento 370mA)
 - i. Una vez estabilizado el valor de la resistencia, pulse Output (4) en el cuadro de ajuste del LAS MODE, activando así la salida. Su correspondiente piloto deberá quedar encendido.
 - ii. Pulsar botón LAS (2) del cuadro de ajuste (se encenderá el piloto inmediatamente superior a dicho botón).
 - iii. Una vez encendido el piloto, la ruleta controla la corriente del láser, girar dicha ruleta con suavidad hasta alcanzar el valor deseado.
 - iv. Una vez alcanzado el valor de corriente deseado, vuelva a pulsar el botón LAS y (2) cerciórese de que el piloto queda apagado.

La corriente típica que consume el láser en el laboratorio es de 0.2 a 0.3 A, aunque fuera del mismo suele ser menor (depende de la temperatura).

9. Fíjese en el medidor EXFO, el siguiente paso es ajustar la potencia óptica a 0dBm en la longitud de onda de trabajo (o la longitud de onda más cercana posible) en el momento de la redacción de este documento 1600nm. Para ello, podrá ver la potencia en el medidor EXFO (2) y deberá configurarla con el atenuador (1), que tiene un tornillo que apretando o aflojándose regula la potencia óptica de la señal.



Figura 7.2.- Medidor EXFO y atenuador óptico

7. Metodología de medida con el prototipo sistema sensor BOTDA.

10. Una vez regulada la potencia óptica, desconecte la fibra del medidor EXFO y conéctela al frontal de la caja BOTDA, donde dice Photodetector.

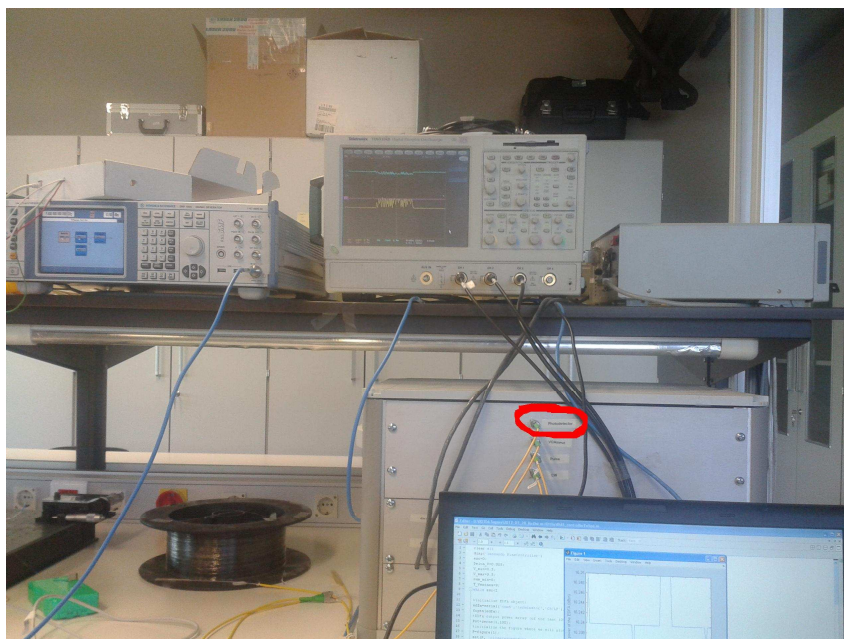


Figura 7.3.- Esquema general del montaje, destacado en rojo “Photodetector”.

11. Vuelva al PC. Ejecute el programa AWG Navigator. Se abrirá una pantalla como la siguiente

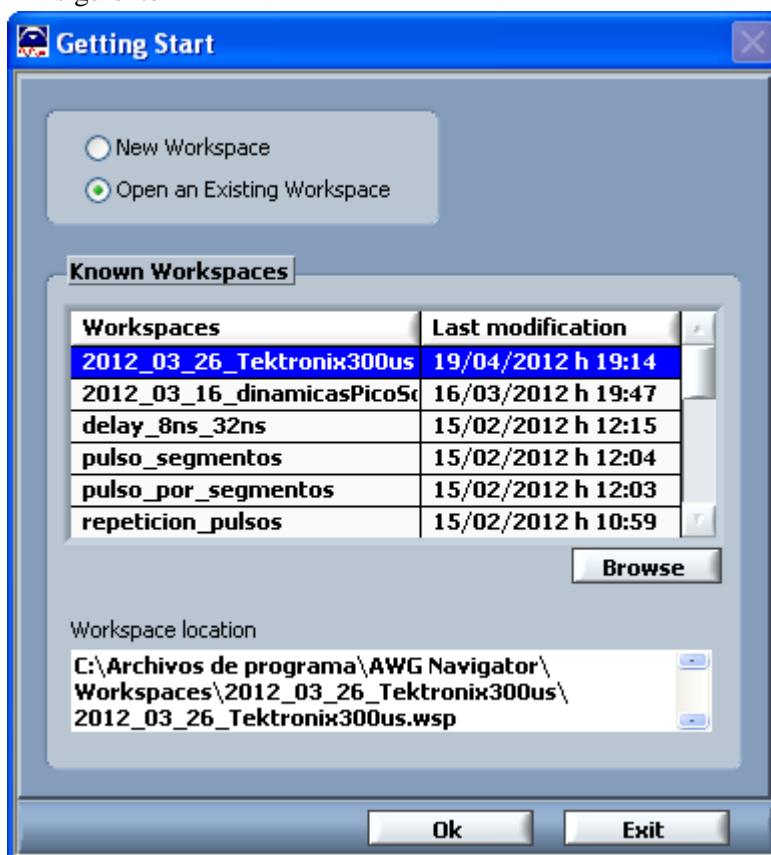


Figura 7.4.- Pantalla de inicio del software AWG Navigator

Elija si quiere realizar un nuevo pulso o si desea cargar una configuración ya creada.

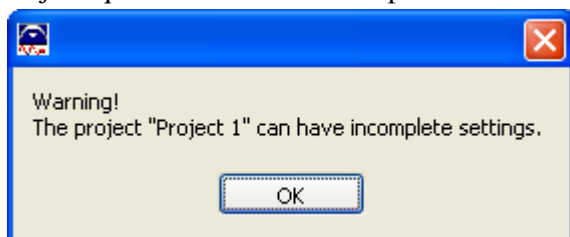


Figura 7.5.- Warning del software AWG Navigator

Ante este mensaje de error no se preocupe, continúe.

Una vez abierto, vaya sobre la pestaña de Control pulse sobre “Upload project”, aparecerá un nuevo warning pero no se preocupe.

Por último, para lanzar el pulso, presione sobre “start”.

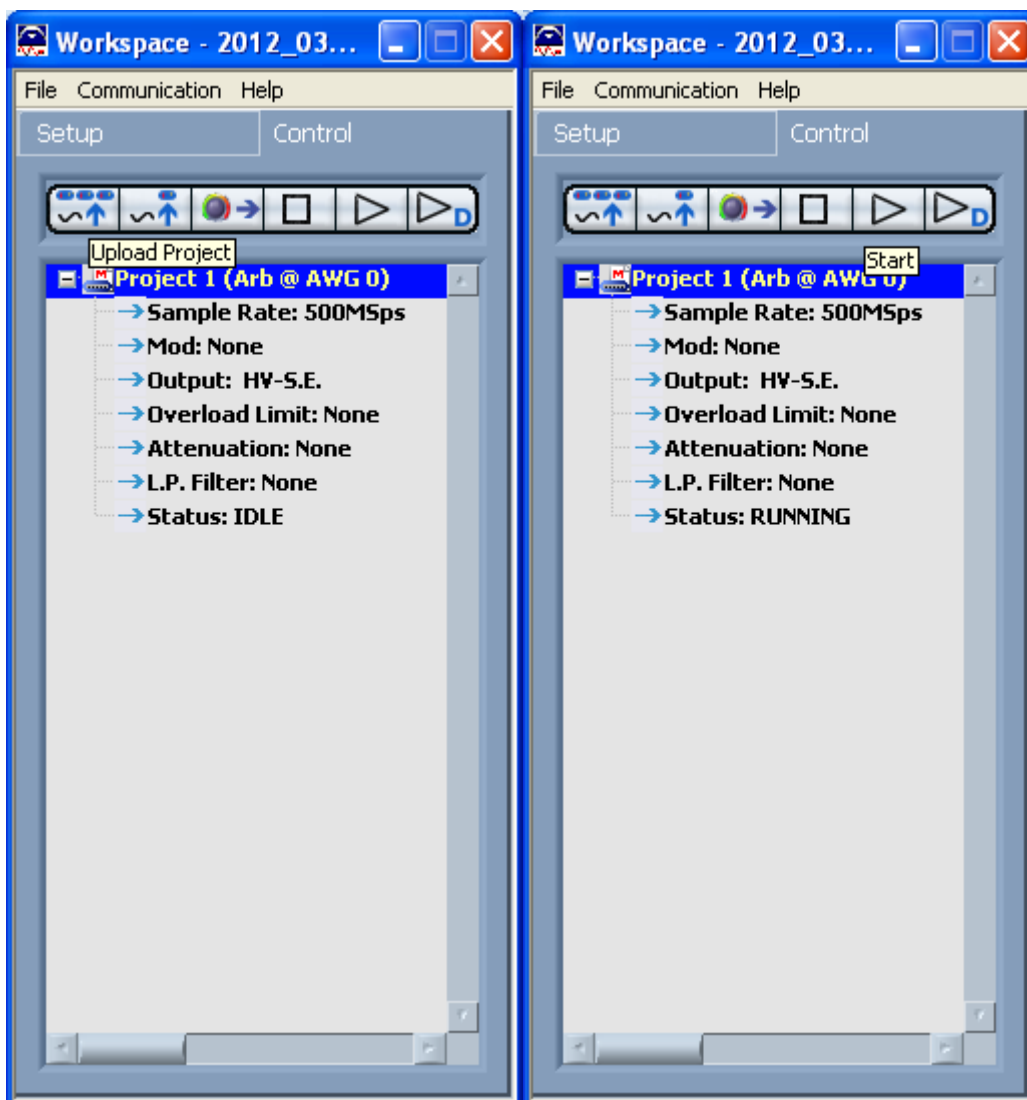


Figura 7.6.- Control del software AWG Navigator

Para saber si el pulso está lanzado o parado fíjese en el Status.

Varios comentarios sobre este software de generación de pulsos:

7. Metodología de medida con el prototipo sistema sensor BOTDA.

- i. Empleamos, por ejemplo, el “2011-03-24 postpump” que genera un pulso de 10ns (incluyendo la rampa) y 0.6 voltios de amplitud seguido de 240 μ s de una onda continua a 0 voltios. Para ello, se crean dos segmentos en el AWG, uno con el pulso y otro con la señal continua.
- ii. Se emplea la configuración de switch seguido de mezclador. Al switch se le aplica el pulso del AWG y al mixer la señal de trigger del AWG. El AWG dispone de un trigger de salida de 60ns que se emplea para activar el mezclador.
- iii. Para conectar con seguridad el trigger del AWG al mezclador se introduce una atenuación de 10 dB, ya que este dispositivo es muy sensible a la tensión y puede averiarse si se le aplica más de 1 voltio.
- iv. La amplitud de salida del AWG está acoplada a 50 Ohms. Por lo tanto, en caso de querer aplicar un pulso de 0.6 voltios a la entrada del mezclador, necesitamos ajustar la tensión de salida a 1.2 voltios. Al switch se le aplica una señal de 6 voltios, lo que se traduce en 3 voltios a la entrada del mismo. Se emplea la salida “High voltage”.
- v. Para aplicar una configuración dada, tenemos que hacer “apply” y “OK” primero en la ventana de “segment” y después en la de “waveform”. A continuación, en la pestaña de control tenemos que subir el proyecto (“upload project”, en ese momento se pone de color azul) y finalmente al “play”. Para cargar una nueva configuración hay que parar la anterior. El software da un error “incomplete settings” pero este se puede ignorar.

12. Habra MATLAB

- a. En la carpeta “D:\Archivos para medir”, están los archivos necesarios para medir.
- b. Abra las siguientes funciones en Matlab, en el siguiente orden:
 - i. edfa_start
 - ii. edfa_stop
 - iii. cambiar_frecuencia
 - iv. BiasController_Felipe
 - v. BOTDA_Tektronix_Switch

13. Encender el EDFA: Ejecute “edfa_start.m”

En este programa puede ajustar la corriente del EDFA, si quisiera parar el programa ejecute “edfa_stop.m”.

Es importante comprobar que el EDFA está conectado a través del puerto USB-Serial adecuado y **ajustar dicho puerto en los programas en Matlab**. Para ello, abrimos el

programa de gestión de conexión de equipos **National Instruments Measurement and Automation explorer** y comprobamos que el EDFA responde en una de las conexiones serie. Para ello, mandamos una orden desde el programa y comprobamos que el EDFA responde. En concreto, el puerto serie conectado en el día en que se escribe el informe es el “com4”.

En caso de que algún programa que controle el EDFA de un error, será necesario reiniciar el EDFA. Para ello, hay que teclear “fclose(edfa)” en la línea de comandos de *Matlab* ejecutar el comando “delete(instrfindall)”esto borra todos los instrumentos creados previamente en la “Instruments ToolBox” de Matlab.

14. Encendemos el generador de microondas Holworth HS1001C: Ejecute “cambiar_frecuencia.m”. En este programa se ajusta la potencia y la frecuencia a las que se genera máxima interacción Brillouin para la fibra que se esté empleando. Por ejemplo, si el desplazamiento en frecuencia Brillouin de la fibra es de 10.8 GHz y el generador de microondas de la rama superior se ha ajustado a 11.7 GHz, esta frecuencia de modulación deber ajustarse a 850 MHz.

El generador de microondas se ajusta de este modo para comprobar en el osciloscopio que se está generando una señal BOTDA. Posteriormente, el programa general se encargará de modificar su frecuencia y potencia.

15. Ejecute BiasController_Felipe

Déjelo en ejecución al menos dos horas para empezar con la primera medida. Verá una pantalla del aspecto:

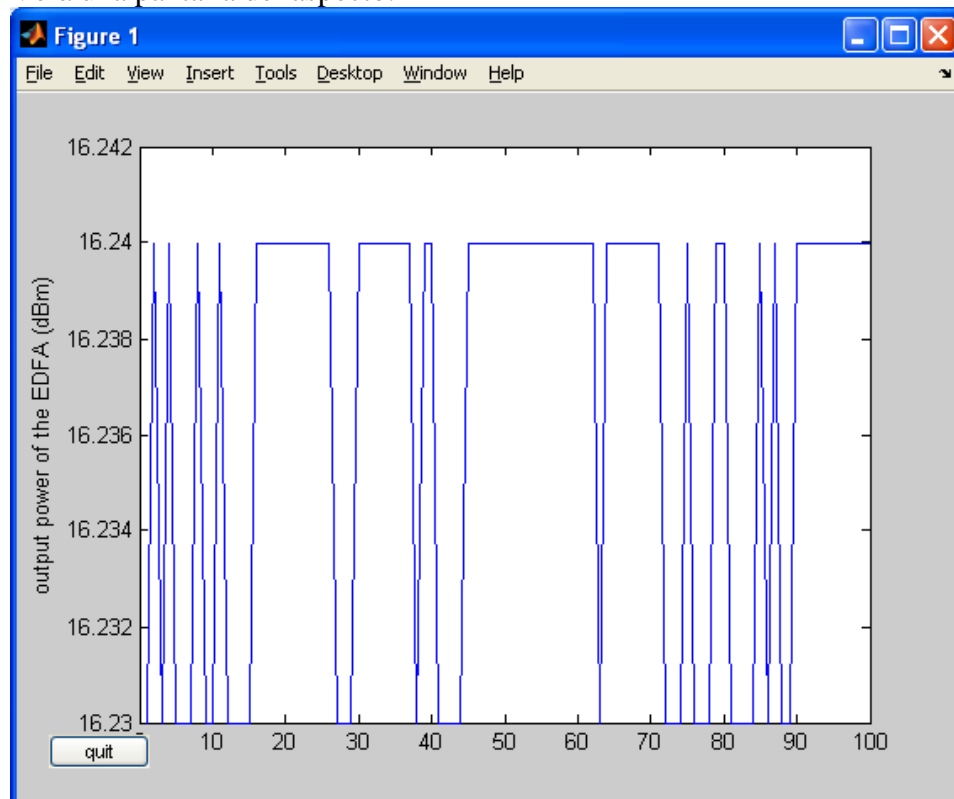


Figura 7.7.- Pantalla del BiasController

Una vez haya pasado el tiempo requerido, pulse el botón quit antes de ejecutar otras rutinas. Deberá lanzar esta rutina antes de lanzar una medida. Con dos minutos de ejecución entre medidas es suficiente.

2.-MEDICIÓN:

1. Vaya al osciloscopio (Tektronix TDS5104B Digital Phosphor Oscilloscope) y cargue una configuración adecuada a la medida que vaya a realizar. Para ello pulse recall, elija la configuración y cárguela.

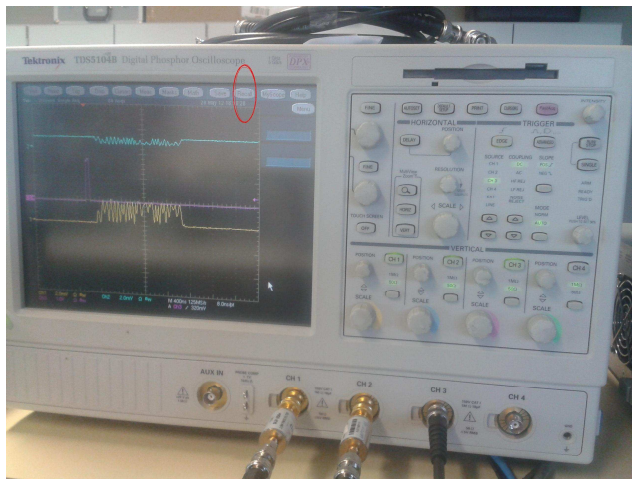


Figura 7.8.- Frontal del Tektronix TDS5104B, destacado en rojo “Recall”

Hay que tener cuidado al ajustar el “record length” (normalmente 500 o 2.500 puntos) y de cambiarlo en el programa de Matlab que controla el BOTDA (cambiar el parámetro “rec_length” en “BOTDA_Tektronix_Switch.m”).

El ancho de banda de adquisición de las señales I y Q lo situamos a 150MHz (ahora se utilizan filtros a la entrada del osciloscopio, así que, en principio, el ancho de banda se puede poner en “full”).

Antes de lanzar el programa principal, debemos comprobar que tenemos señal BOTDA en el osciloscopio.

2. BOTDA_Tektronix_Switch

- a. Antes de lanzar el programa deberá definir los parámetros:
 - i. number_of_measurements, número de medidas a realizar
 - ii. nombre, nombre con el que se vana guardar los datos de la medida.
 - iii. f_cent, frecuencia central en GHz
 - iv. f_span, frecuencia de span en MHz
 - v. f_step, modulo de la variación de la frecuencia en MHz
 - vi. rec_length, número de puntos de la traza, que será el que hayamos determinado en la configuración del osciloscopio.
 - vii. Indice_inicio, punto de inicio de la traza BOTDA.
 - viii. Indice_final, punto final de la traza BOTDA.
 - ix. f_MHz, frecuencia de modulación.
- b. Es conveniente crear un directorio nuevo donde guardar los programas y medidas de cada día.

- c. Ya puede lanzar el programa “BOTDA_Tektronix_Switch.m”. Al término de las medidas escuchará tres “beep”. En este momento las medidas han finalizado y todos los datos se han guardado. Relance el bias controller 2 minutos en caso de que vaya a seguir midiendo.

3.-APAGAR EL EQUIPO:

1. Ejecute en Matlab la línea 25 del programa cambiar_frecuencia:
“calllib('HS1001','RFPowerOff','194')”
2. Ejecute en Matlab el programa edfa_stop
3. Cierre Matlab.
4. Pulse stop en el AWG Navigator y cierre dicho software.
5. Asegúrese de que el emisor de radiofrecuencia está desactivado. A continuación apáguelo.
6. Apague el osciloscopio.
7. Vaya al controlador de láser ILX Lightwave:
 - i. Pulsar botón LAS (2) del cuadro de ajuste, (se encenderá el piloto inmediatamente superior a dicho botón).
 - ii. Una vez encendido el piloto, la ruleta controla la corriente del láser, girar dicha ruleta con suavidad hasta alcanzar 0mA.
 - iii. Una vez alcanzado el valor de corriente 0mA, vuelva a pulsar el botón LAS (2) y cerciórese de que el piloto queda apagado.
 - iv. Pulse Output (4) y cerciórese de que el piloto queda apagado.
 - v. Espere a que se estabilice el valor de la resistencia.
 - vi. Pulse Output (3) y cerciórese de que el piloto queda apagado.
 - vii. Gire la llave a la posición de apagado.
8. Desenchufe la caja BOTDA.
9. Apague el portátil.

Capítulo 8

Caracterización de la saturación del EDFA en función del intervalo entre pulsos.

1.-INTRODUCCIÓN

Los pulsos generados mediante el modulador en doble banda lateral con portadora suprimida, son amplificados en un EDFA antes de ser inyectados en la fibra. La amplitud de estos pulsos depende tanto de la potencia de los mismos a la salida del modulador como de la amplificación que sufren en el EDFA. Sin embargo, esta amplificación se ve afectada por el intervalo entre pulsos, ya que cuando este es muy pequeño produce una saturación en el amplificador óptico.

Se desea conocer el intervalo mínimo entre pulsos que podemos emplear con el actual EDFA. Para ello, se propone medir diferentes trazas BOTDA conforme se varía el intervalo entre pulsos, de tal forma que pueda cuantificarse dicha saturación.

Nótese que para el propósito de este experimento no es necesario realizar un barrido de la separación en frecuencia entre onda de bombeo y onda de prueba, ya que la propia amplitud de la traza BOTDA es indicativa de la amplitud del pulso.

2.-DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y MÉTODO OPERATIVO

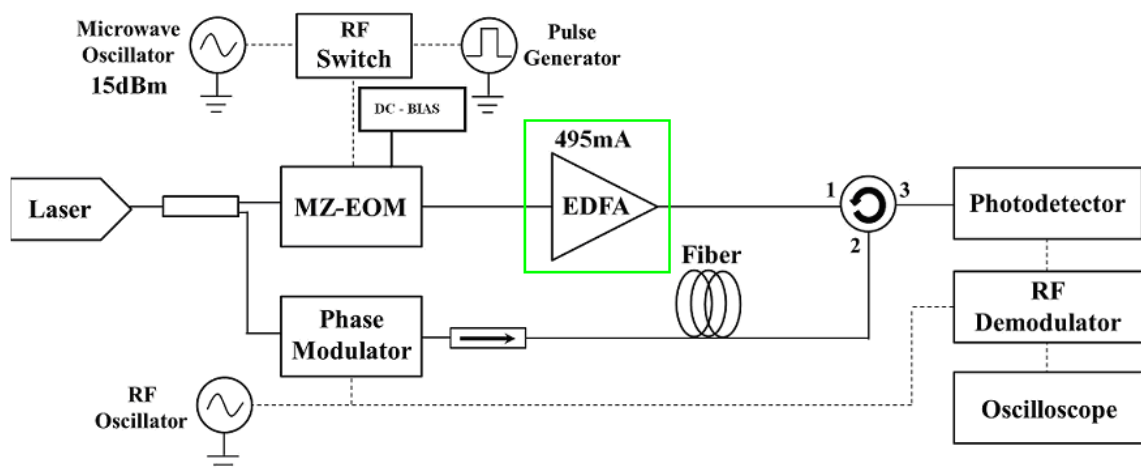


Figura 8.1. Esquema general, sensores distribuidos de fibra óptica basados en Brillouin Optical Time Domain Analysis. En verde la situación del amplificador EDFA.

Con el dispositivo experimental de la figura 8.1 y lanzando pulsos de 1ns de anchura se ha realizado la captura de la traza BOTDA resultante para distintos tiempos de separación entre pulsos, en el siguiente orden:

300 μ s	200 μ s	100 μ s	50 μ s	25 μ s	10 μ s	5 μ s	3 μ s	2 μ s	1 μ s
-------------	-------------	-------------	------------	------------	------------	-----------	-----------	-----------	-----------

3.-ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en una gráfica que representa la amplitud de la traza BOTDA en función del intervalo de separación entre dos pulsos consecutivos.

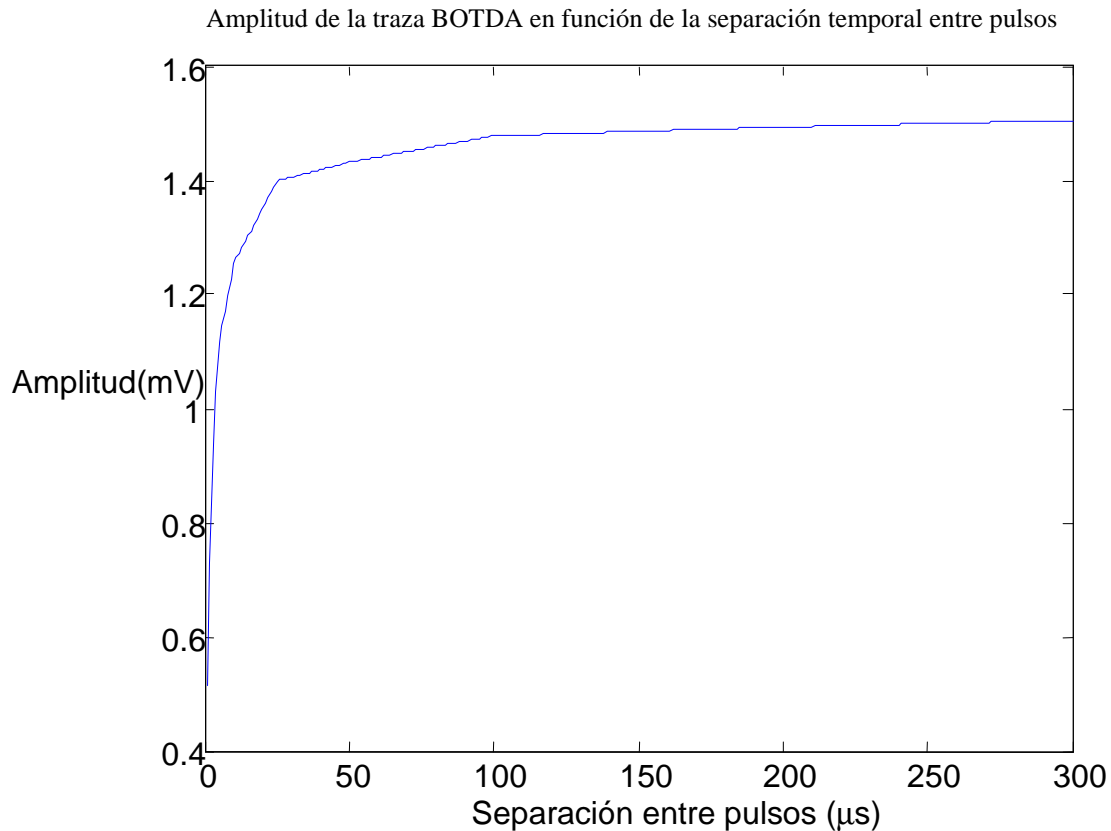


Figura 8.2. Amplitud de la traza BOTDA en función de la separación temporal entre los pulsos.

La amplitud de la traza BOTDA, permanece estable siempre que la separación entre pulsos es superior a $100\mu\text{s}$. Cuando ésta es inferior a $100\mu\text{s}$, el EDFA empieza a tener dificultades para amplificar los pulsos que le llegan.

La caída de la amplitud de la traza BOTDA en función de la separación entre pulsos es logarítmica y decrece desde $1,5\text{mV}$ (obtenido para una separación entre pulsos de $100\mu\text{s}$) hasta $0,5\text{mV}$ (obtenido para una separación entre pulsos de $1\mu\text{s}$). Mientras que la diferencia de amplitud para una traza obtenida a partir de pulsos separados $300\mu\text{s}$ y otra obtenida a partir de pulsos separados $100\mu\text{s}$ es de $0,1\text{mV}$.

4.-CONCLUSIONES

- El EDFA disminuye su amplificación de los pulsos a partir de una separación temporal entre ellos inferior a $100\mu\text{s}$.
- El EDFA responde adecuadamente conforme a los objetivos perseguidos por el sistema sensor BOTDA diseñado en el departamento de ingeniería eléctrica y electrónica de la UPNA.

Capítulo 9

CALIBRACIÓN Y CORRECCIÓN IQ

INTRODUCCIÓN

Los sistemas receptores en cuadratura diseñados para producir dos señales de salida ortogonales son utilizados a menudo en los sistemas de telecomunicaciones. En el caso prototipo sensor BOTDA, la recepción de la señal BOTDA se realiza mediante un esquema síncrono empleando una detección IQ. Esto es, se recibe la señal de RF y multiplicándola por una señal de su misma frecuencia, se recupera la señal original en banda base. Al multiplicar dos señales iguales en contrafase el resultado es nulo, y por el contrario si están en fase el resultado es mayor de lo que debería. Para evitar este fenómeno de anulación o amplificación, se multiplica la señal RF por un coseno y por un seno, después se calcula el módulo de la suma vectorial de las mismas, recuperándose así la señal original.

Por otra parte, se ha observado que en el momento de realizar la demodulación, debido a las características de los dispositivos implicados en ellas se introduce un desfase no deseado (θ_e) entre el canal I y el canal Q así como una variación de amplitud (A_e) entre ambos canales. Ello produce un error en los resultados finales.

Para poder realizar correctamente esta detección, es necesario realizar una calibración previa de la misma. Ésta a día de hoy se realiza mediante un programa de Matlab, empleando el generador Holworth y el Rohde SMT02.

El objetivo es implementar un método de calibración que sea lo más automático, correcto y elegante posible. En este sentido:

- Se realizará un programa de Matlab que realice la calibración IQ
- Se comprobará el buen funcionamiento de dicha calibración IQ, así como su estabilidad en el tiempo (si se realizan varias calibraciones IQ en días diferentes, todas ellas deberían ser prácticamente iguales). Se puede llegar a estimar el error que se comete en la misma.
- Se escribirá una documentación detallada y precisa que describa tanto el método empleado para realizar la demodulación IQ, la calibración y el propio programa de Matlab.

9. CALIBRACIÓN Y CORRECCIÓN IQ

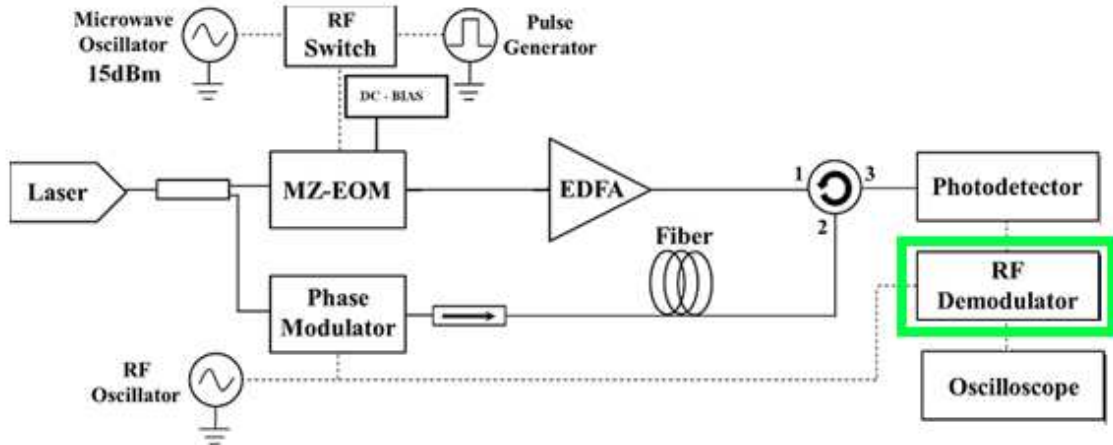


Figura 9.1. Esquema general del prototipo y situación de la demodulación IQ.

FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA CORRECCIÓN.

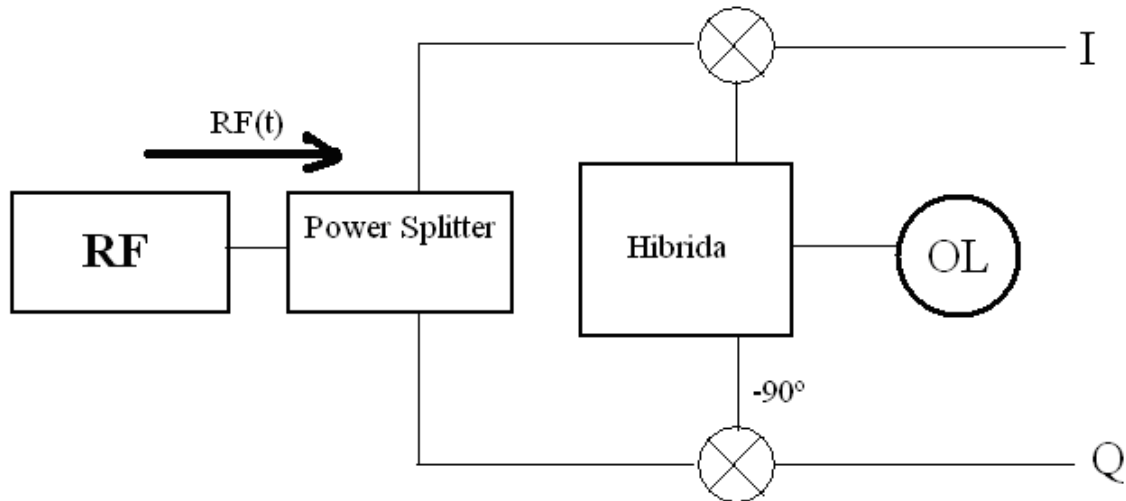


Figura 9.2. Esquema básico de una detección IQ.

$$RF(t) = A \cos(2\pi f_{RF} t + \theta) \quad V_{LO}(t) = A_{LO} \cos(2\pi f_{RF} t)$$

Idealmente

- $I \propto A \cos \theta$
- $Q \propto A \sin \theta$

Sin embargo, si Q e I no tienen la misma ganancia y la híbrida de 90° no es perfecta se tendría:

- $I' \propto A \cos(2\pi f_{RF} t + \theta) \cos(2\pi f_{RF} t) \propto A \cos \theta$
- $Q' \propto A_e A \cos(2\pi f_{RF} t + \theta) \cos\left(2\pi f_{RF} t + \frac{\pi}{2} - \theta_e\right) \propto A_e A \cos(\theta - \frac{\pi}{2} + \theta_e) = A_e A \sin(\theta + \theta_e)$

(Nota: todo el error se acumula al canal Q)

Se obtiene I, Q a partir de la medida de I', Q' aplicando la siguiente transformación (Gram-Schmidt) una vez conocido θ_e y A_e :

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \theta \\ -\operatorname{tg} \theta_e & \frac{1}{A_e \cos \theta_e} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I' \\ Q' \end{bmatrix}$$

Esto se demuestra si se utilizan las expresiones:

- $I = I' = A \cos \theta$
- $Q = -\operatorname{tg} \theta_e A \cos \theta + \frac{1}{A_e \cos \theta_e} A_e A \operatorname{sen}(\theta + \theta_e) = -\operatorname{tg} \theta_e A \cos \theta + \frac{A \operatorname{sen} \theta \cos \theta_e + A \cos \theta \operatorname{sen} \theta_e}{\cos \theta_e} =$
 $= -\operatorname{tg} \theta_e A \cos \theta + A \operatorname{sen} \theta + A \cos \theta \operatorname{tg} \theta_e = A \operatorname{sen} \theta$
- Cálculo de θ_e , A_e :

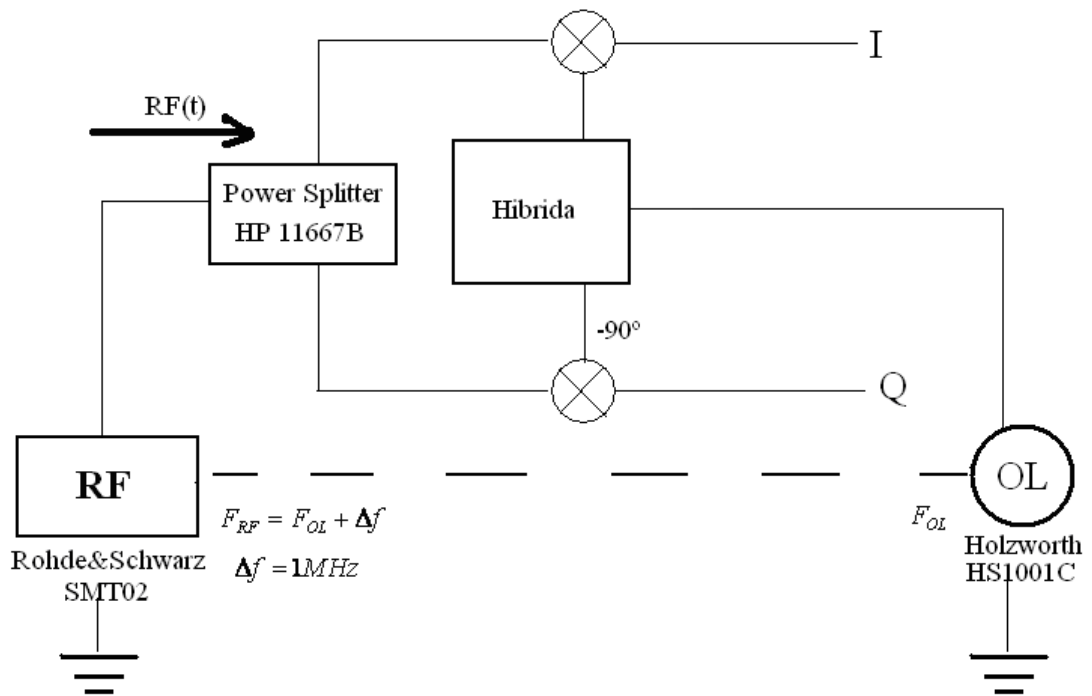


Figura 9.3. Esquema propuesto para la calibración IQ.

Las señales a la salida de I y Q en este caso son:

- $I_m = A \cos(2\pi f_{RF} t + \theta) \cos(2\pi f_{OL} t + \varphi) \propto A \cos(2\pi \Delta f t + \theta - \varphi)$
- $Q_m = A_e A \cos(2\pi f_{RF} t + \theta) \cos\left(2\pi f_{OL} t + \varphi + \frac{\pi}{2} - \theta_e\right) \propto A_e A \cos\left(-2\pi \Delta f t - (\theta - \varphi) + \frac{\pi}{2} - (+\theta_e)\right) =$
 $A_e A \operatorname{sen}(2\pi \Delta f t + (\theta - \varphi) + \theta_e)$

9. CALIBRACIÓN Y CORRECCIÓN IQ

Gráficamente estas dos senoidales superpuestas serían:

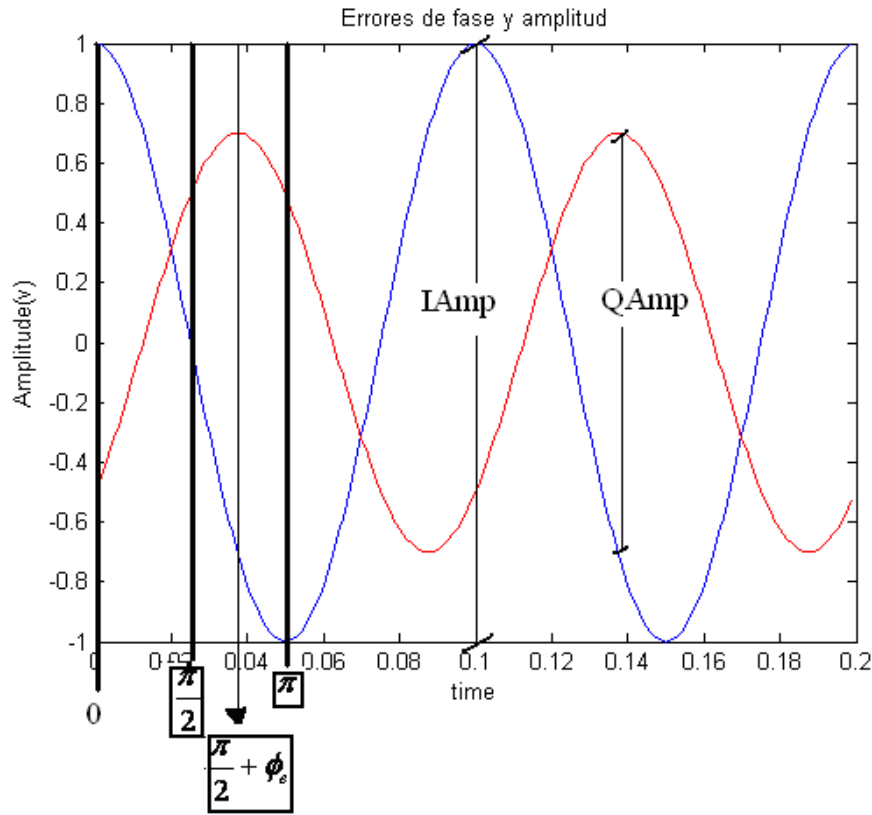


Figura 9.4. Visualización de los errores de fase y amplitud introducidos por los dispositivos en la modulación IQ.

Entonces

- $A_e = \frac{I_{mp-p}}{Q_{mp-p}}$
- $\theta_e = \theta_I - \theta_Q + \frac{\pi}{2}$

En caso de que halla un offset DC a la salida de las mezcladoras, es decir:

- $I' \propto A \cos \theta + I_{offset}$
- $Q \propto A_e A \sin(\theta + \theta_e) + Q_{offset}$

Entonces la transformación a hacer para recuperar I, Q es:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \theta \\ -tg \theta_e & \frac{1}{A_e \cos \theta_e} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I' - I_{offset} \\ Q' - Q_{offset} \end{bmatrix}$$

De esta manera, para cada frecuencia obtendremos cuatro parámetros de corrección $(A_e, \theta_e, I_{offset}, Q_{offset})$, que utilizaremos para la corrección de las medidas.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y MÉTODO OPERATIVO

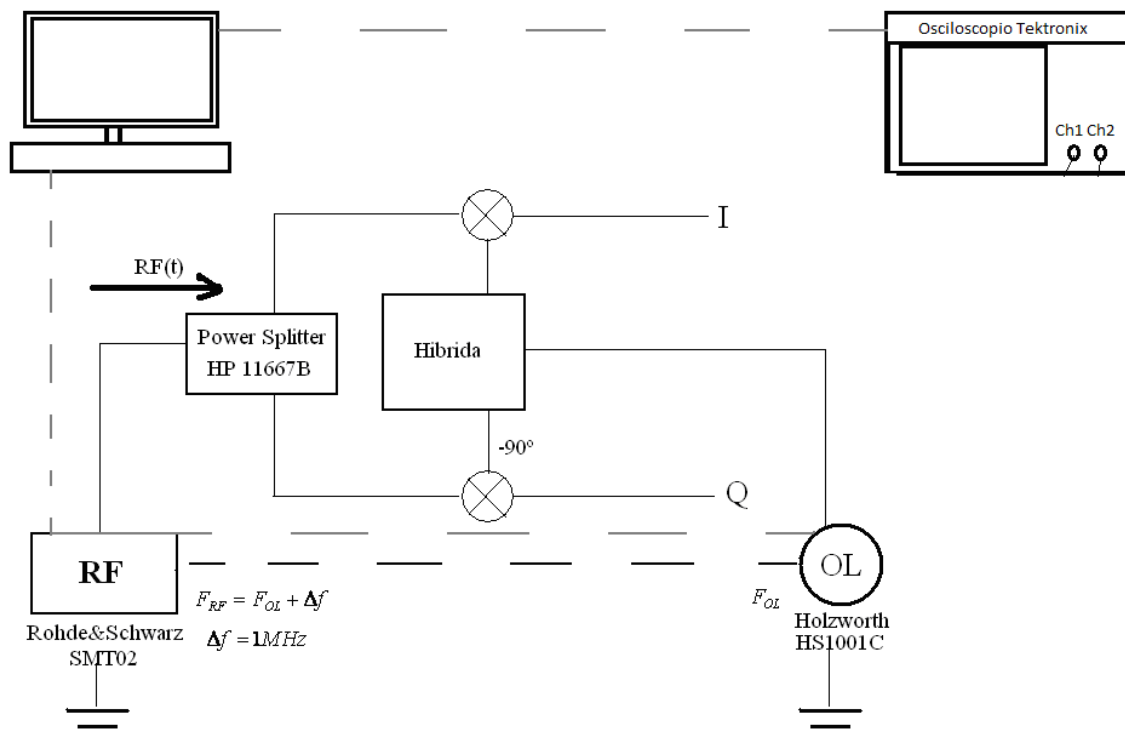


Figura 9.5. Dispositivo experimental utilizado para la obtención de los parámetros de corrección de la demodulación IQ.

Para realizar la calibración, el dispositivo experimental empleado es el de la figura 9.5.

1. Se ha realizado un barrido en frecuencia con el Rohde&Schwarz SMT02, desde 200MHz hasta 1000MHz ya que estas son las frecuencias recibidas en el esquema del prototipo. Este generador, a su vez está sincronizado con el generador Holzworth HS1001C.
2. La señal de RF se divide en dos en el Power Splitter HP 11667B y cada una de éstas se encamina por uno de los canales.
3. Cada una de estas dos señales se multiplica en los mezcladores con la señal proveniente del Holzworth, de 10 kHz. El canal I se multiplica por un coseno de esa frecuencia mientras que el canal Q lo hace por un seno, quedando así los dos canales desfasados 90°.
4. Se reciben ambas señales en el osciloscopio Tektronix y se procesan como describe la rutina que se ha implementado y explica este informe.

Como primera parte de la implementación de un método de calibración y corrección IQ se ha realizado un estudio de las señales Q e I. Para ello se ha montado el dispositivo experimental de la figura 9.5. Se ha procesado la señal recibida tanto en un analizador de espectros como realizando la trasformada de Fourier de la señal recibida. Esto se describe a continuación.

ESTUDIO DE LA SEÑAL

Una vez montado el dispositivo se ha capturado la señal en un analizador de espectros, obteniendo el espectro de la figura 9.6.

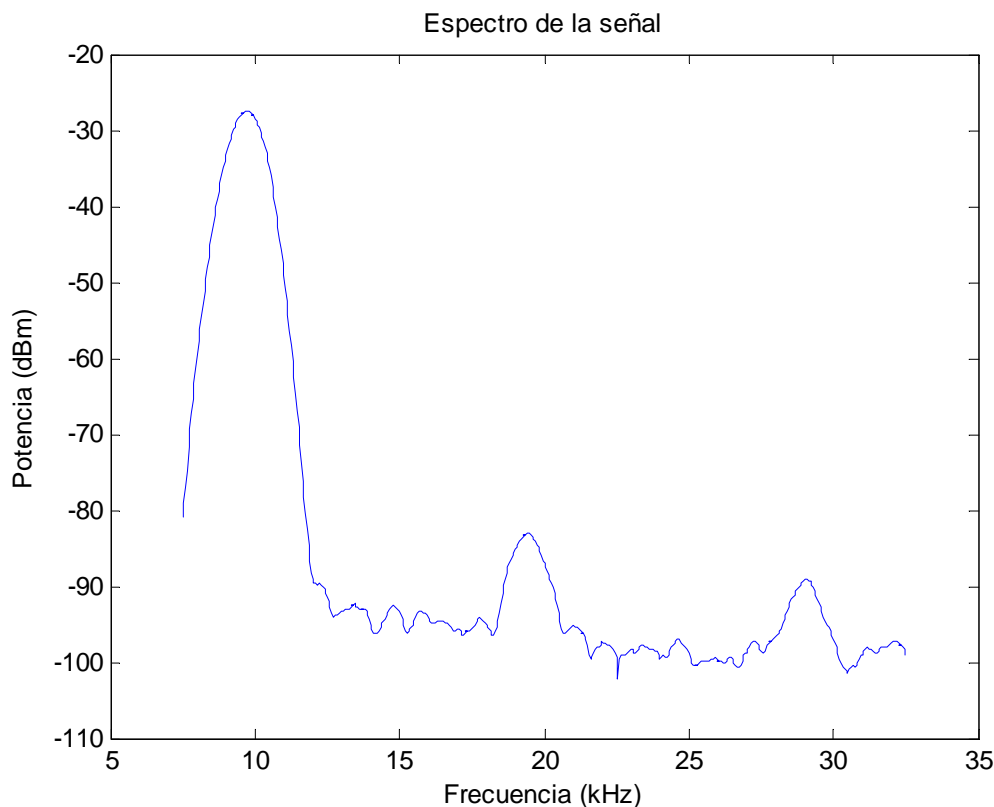


Figura 9.6. Espectro (módulo) de la señal que circula por el canal I y Q.

Con la información de la figura, se ha concluido que la señal obtenida en cada canal es:

- $I' = A_1 \cos(2\pi F_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2 \times 2\pi F_0 t + \varphi_2) + A_3 \cos(3 \times 2\pi F_0 t + \varphi_3)$
- $Q' = A_e A_1 \sin(2\pi F_0 t + \varphi_1 + \varphi_e) + A_2 \sin(2 \times 2\pi F_0 t + \varphi_2) + A_3 \sin(3 \times 2\pi F_0 t + \varphi_3)$
donde $F_0 = 10\text{kHz}$.

Posteriormente se ha recibido la señal el osciloscopio Tektronix, se ha realizado la transformada de Fourier de la señal y se ha analizado la fase de los tres componentes frecuenciales que componen la señal, variando la frecuencia F_{RF} (Véase ANEXOII). Se deduce que la fase del componente frecuencial de 10kHz es aproximadamente constante, no así las fases de los dos primeros armónicos de dicha frecuencia, con fases aparentemente aleatorias. Véase ANEXO II.

LA RUTINA

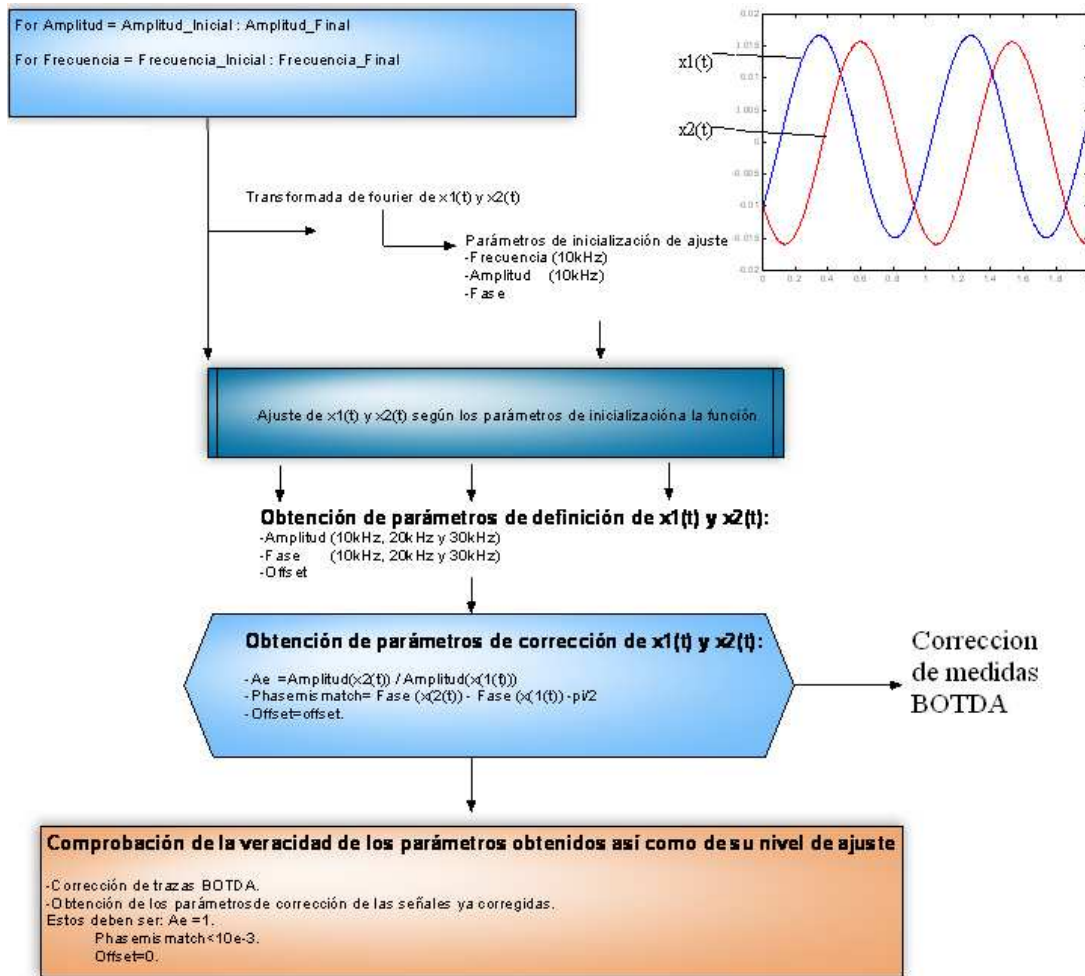


Figura 9.7. Diagrama de bloques de la rutina implementada.

Se realiza un barrido de varias amplitudes de señal RF (-20dB, -15 dB y -10 dB) para un barrido frecuencial (200MHz – 1GHz) y se capturan las trazas obtenidas tanto para el canal I como para el canal Q. Una vez capturadas las trazas y comprobado que son correctas, se obtienen los parámetros de cada traza:

- Offset de la señal.
- Frecuencia principal. F_0
- Amplitud de dicha componente. A_1
- Fase de dicha componente. φ_1
- Amplitud del primer armónico. A_2
- Fase de dicha componente. φ_2
- Amplitud del segundo armónico. A_3
- Fase de dicha componente. φ_3

Estos parámetros se obtienen con el comando nlinfit de Matlab ajustando una señal teórica a las trazas obtenidas en la medición, dando valor a los parámetros: Offset, A_1 , F_0 , φ_1 , A_2 , φ_2 , A_3 , φ_3 .

Se ha decidido que la función teórica se llame “funcion2” y se define:

$$\text{Offset} + A_1 \cos(2\pi F_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2 \times 2\pi F_0 t + \varphi_2) + A_3 \cos(3 \times 2\pi F_0 t + \varphi_3)$$

9. CALIBRACIÓN Y CORRECCIÓN IQ

Como se aprecia en la figura 3, esta definición matemática describe la señal medida. Véase ANEXO I.

1. Cálculo de los parámetros de inicialización con la Transformada de Fourier de la traza recibida.

Para realizar un buen ajuste de la señal teórica (funcion2) a la señal medida mediante el comando `nlinfit` de Matlab, es crítica una correcta definición de ciertos parámetros de inicialización, que son:

- Frecuencia principal. F_0
- Amplitud de dicha componente. A_1
- Fase de dicha componente. φ_1

Estos valores se calculan en la primera iteración del programa, para cada amplitud, realizando la transformada de Fourier de $x_1(t)$ y $x_2(t)$.

El resto de parámetros de inicialización: Offset, A_2 , φ_2 , A_3 , φ_3 , se definirán con valores aproximados, esto no impide que se realice un buen ajuste.

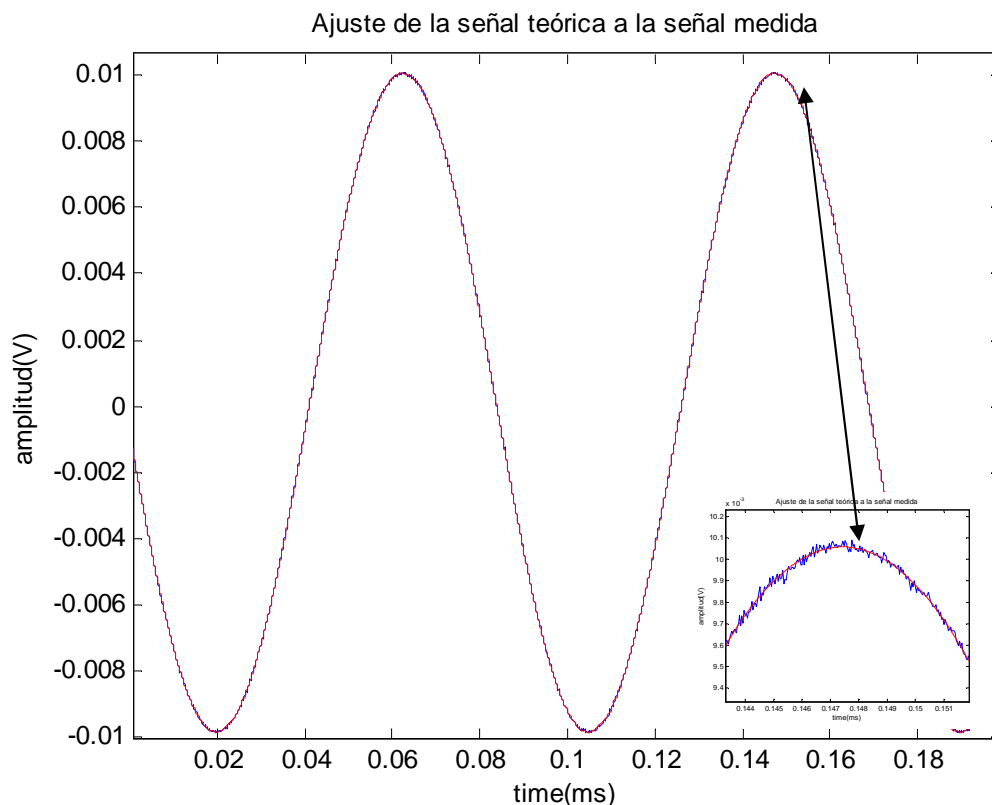


Figura 9.8. Ajuste de la señal teórica (rojo) a la señal medida (azul).

2. Obtención de los parámetros de corrección.

Una vez realizado el ajuste, el comando `nlinfit` de Matlab da como resultado los valores de los parámetros de ajuste parámetros (Offset, A_1 , F_0 , φ_1 , A_2 , φ_2 , A_3 , φ_3 .) que mejor ajustan la función2 a la señal medida. De ese modo, obtenemos los datos necesarios para calcular los parámetros de corrección IQ: **Offset, A_1 , F_0 , φ_1 .**

El ajuste se realiza para cada canal, es decir, para $x_1(t)$ y para $x_2(t)$, teniendo como resultado:

Offset1, A_1 1, φ_1 1.

Offset2, A_1 2, φ_1 2.

Convertir amplitudes negativas en amplitudes positivas.

En ocasiones el comando `nlinfit` de Matlab da como resultado una amplitud negativa, en ese caso se cambia el signo a dicha amplitud y se resta π a su fase, ya que un A_e daría como resultado una traza BOTDA negativa.

Si $A_11 < 0$ $A_11 = -A_11$ y $\varphi_11 - \pi$

Si $A_12 < 0$ $A_12 = -A_12$ y $\varphi_12 - \pi$

Automatización del cálculo del desfase.

- Subir la fase de ambos canales a valores positivos sumando múltiplos enteros de 2π , dejando las fases aproximadamente entre 0 y 2π

Mientras $\text{mínimo}(\varphi_11) < 0$

$\varphi_11 = \varphi_11 + 2\pi$

Mientras $\text{mínimo}(\varphi_12) < 0$

$\varphi_12 = \varphi_12 + 2\pi$

Mientras $\text{mínimo}(\varphi_11) > 2\pi$

$\varphi_11 = \varphi_11 - 2\pi$

Mientras $\text{mínimo}(\varphi_12) > 2\pi$

$\varphi_12 = \varphi_12 - 2\pi$

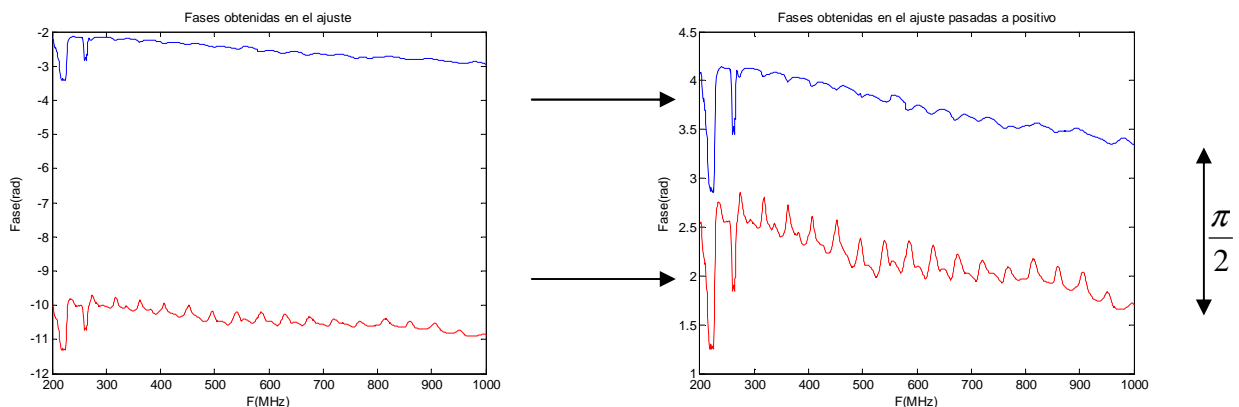


Figura 9.9. Colocación de las fases en el plano positivo, para φ_11 (azul) y φ_12 (rojo).

- Colocar la fase del Canal 2 por debajo de la del Canal 1. Esta rutina calcula el desfase con la fórmula: $\text{desfase} = \varphi_12 - \varphi_11$. y posteriormente suma $\pi/2$ ó $3\pi/2$ resultando el error de fase. Para que este valor sea correcto, $\varphi_12 < \varphi_11$.

Mientras $\varphi_11 < \varphi_12$ $\varphi_11 = \varphi_11 + 2\pi$

- Restar la fase del Canal 2 menos la del Canal 1 y sumarle $\pi/2$ o $3\pi/2$.

9. CALIBRACIÓN Y CORRECCIÓN IQ

Por definición, La señal del canal 1 y la del canal 2 deben estar desfasadas aproximadamente $\pi/2$, es decir, $\phi_{12} - \phi_{11} = \pi/2$ ó $\phi_{12} - \phi_{11} = -\pi/2$. Por las características de la rutina, $\phi_{12} - \phi_{11} = \pi/2$ ó $\phi_{12} - \phi_{11} = 3\pi/2$ (las señales senoidales son señales 2π periódicas, por ello, un desfase de $-\pi/2$ es lo mismo que un desfase de $3\pi/2$, propiedad que aprovechamos y por la cual convertimos $-\pi/2$ en $+3\pi/2$).

$$\text{Desfase} = \phi_{12} - \phi_{11} + \frac{\pi}{2}$$

$$\text{Si media (Desfase)} > 1 \quad \text{Desfase} = \phi_{12} - \phi_{11} + 3 \times \frac{\pi}{2}$$

$$\theta_e = \text{Desfase}$$

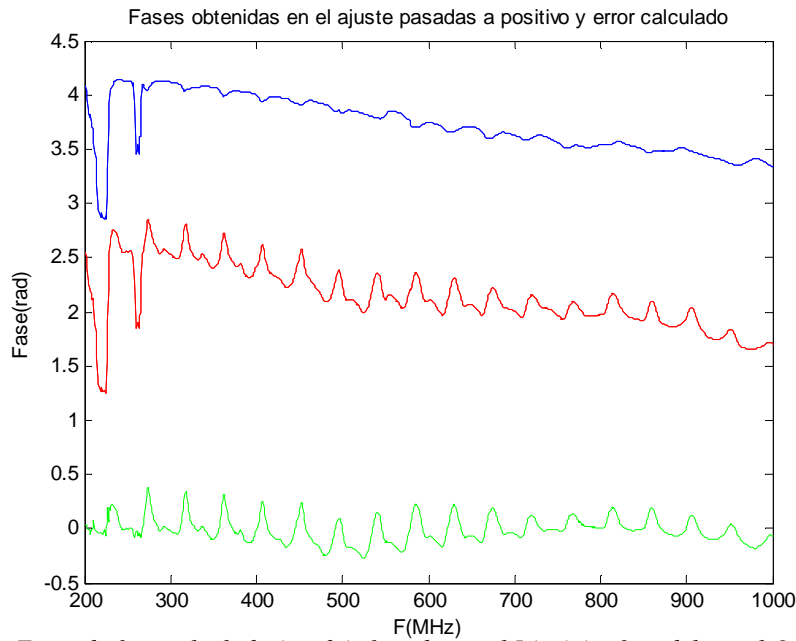


Figura 9.10. Error de fase calculado (verde), fase de canal I (rojo) y fase del canal Q (azul).

Aquí se identifican los valores obtenidos:

$$\begin{array}{lll} \mathbf{I_{offset}} = \mathbf{Offset2} & \mathbf{I_{mp-p}} = \mathbf{A_12} & \theta_I = \phi_{12} \\ \mathbf{Q_{offset}} = \mathbf{Offset1} & \mathbf{Q_{mp-p}} = \mathbf{A_11} & \theta_Q = \phi_{11} \end{array}$$

Se calculan los parámetros de corrección:

$$A_e = \frac{I_{mp-p}}{Q_{mp-p}}$$

$$\theta_e = \theta_I - \theta_Q + \frac{\pi}{2} \quad \text{ó} \quad \theta_e = \theta_I - \theta_Q + 3 \times \frac{\pi}{2}$$

Se corrigen las medidas BOTDA con los parámetros de corrección calculados:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \theta \\ -\tan \theta_e & \frac{1}{A_e \cos \theta_e} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I' - I_{offset} \\ Q' - Q_{offset} \end{bmatrix}$$

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN MEDIDAS BOTDA

Espectro de amplitud Brillouin obtenido a partir de varias correcciones IQ

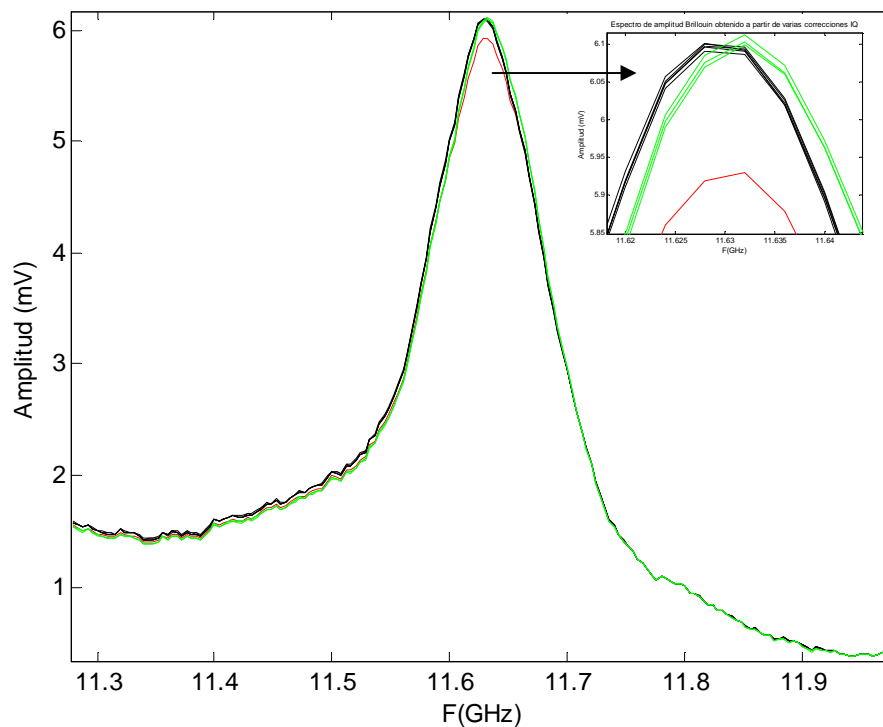


Figura 9.11. Espectro de amplitud Brillouin obtenido con varias correcciones IQ realizadas en el día 1 (negro), el día 2, tras desmontar y volver a montar el montaje (verde) con la rutina descrita en este informe, y una corrección realizada con los parámetros anteriormente utilizados (rojo).

Espectro de fase Brillouin obtenido a partir de varias correcciones IQ

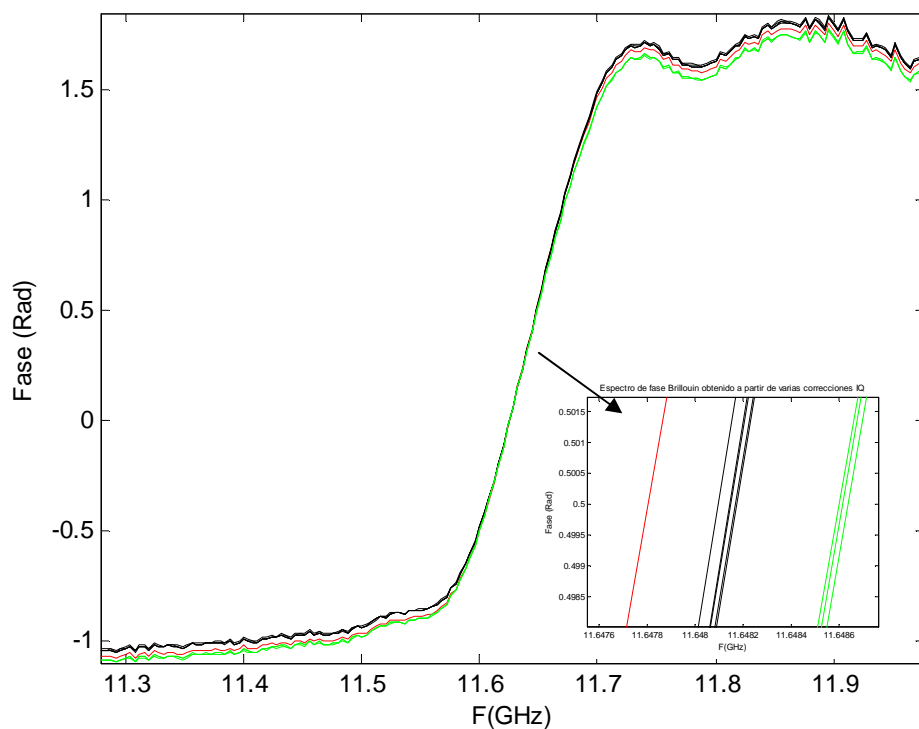


Figura 9.12. Espectro de fase Brillouin obtenido con varias correcciones IQ realizadas en el día 1 (negro), el día 2, tras desmontar y volver a montar el montaje (verde) con la rutina descrita en este informe, y una corrección realizada con los parámetros anteriormente utilizados (rojo).

9. CALIBRACIÓN Y CORRECCIÓN IQ

La variación de amplitud en el espectro BOTDA para la misma medida, y 5 correcciones IQ distintas realizadas en distintos momentos, sin haber desmontado el montaje, con la rutina descrita en este informe; tienen una variación máxima de 0.015mV (Véase figura 9.11).

En el caso de haber desmontado el montaje experimental y haberlo vuelto a montar, días más tarde, la variación asciende a 0,025mV (Véase figura 9.11).

La variación de fase en el espectro BOTDA para el mismo caso, sin desmontar el montaje tiene una variación máxima de 0.01rad (Véase figura 9.12).

En el caso de haber desmontado el montaje experimental y haberlo vuelto a montar, días más tarde, la variación asciende a 0,07rad (Véase figura 9.12).

La amplitud del espectro obtenido con la nueva rutina, es superior a la obtenida con parámetros de corrección anteriores, para frecuencias entre 11,6GHz y 11,7GHz (Véase figura 9.11).

BFS obtenido a partir de varias correcciones IQ, a partir del espectro en amplitud

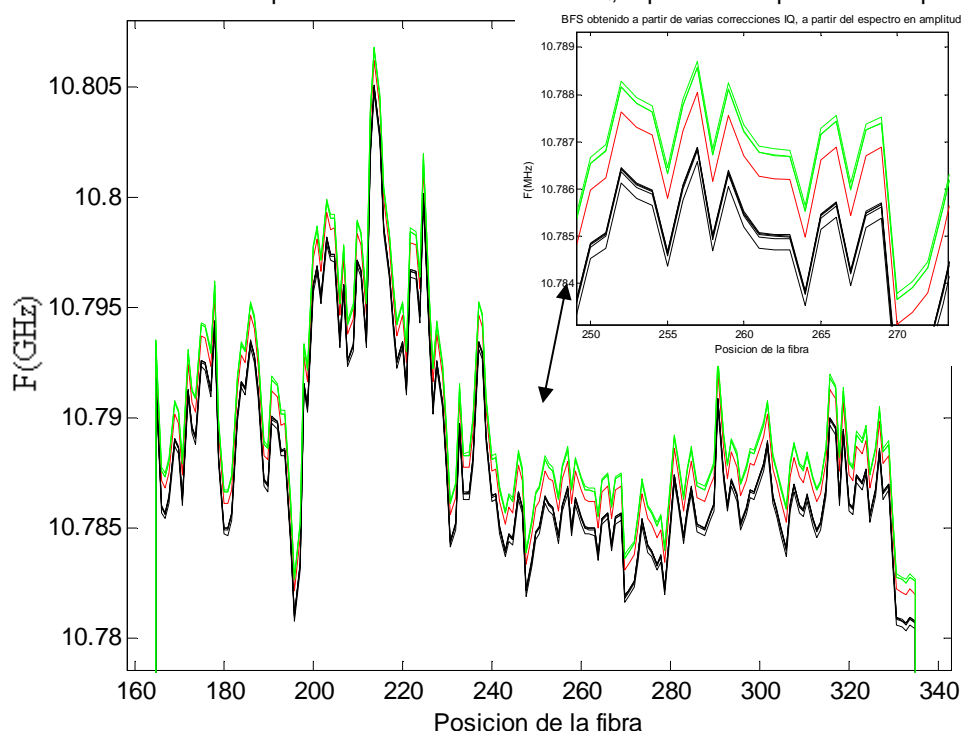


Figura 9.13. BFS obtenido con varias correcciones IQ realizadas en el día 1 (negro), el día 2, tras desmontar y volver a montar el montaje (verde) con la rutina descrita en este informe, y una corrección realizada con los parámetros anteriormente utilizados (rojo) a partir del espectro de amplitud.

La variación máxima de BFS (obtenido a partir del espectro en amplitud) para la misma medida, y 5 correcciones IQ distintas realizadas en distintos momentos, con la rutina descrita en este informe, sin haber desmontado el montaje; es 0,4 MHz.

En el caso de haber desmontado el montaje y haberlo montado de nuevo es de 2 MHz (Véase figura 9.13).

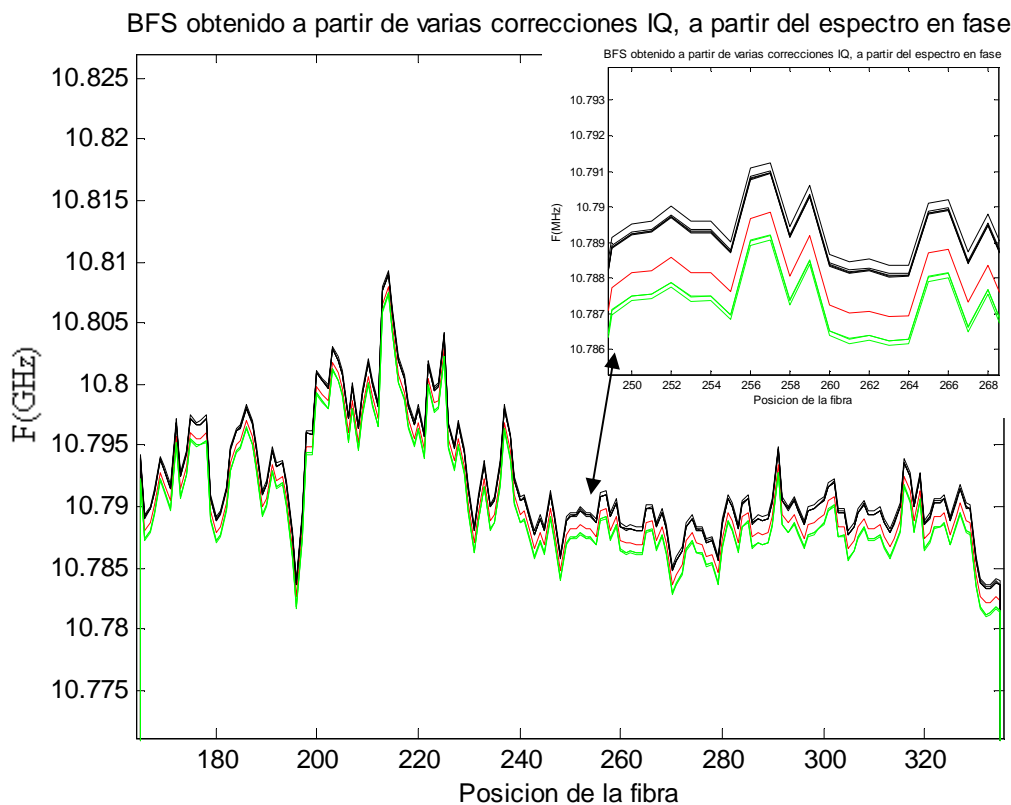


Figura 9.14. BFS obtenido con varias correcciones IQ realizadas en el día 1 (negro), el día 2, tras desmontar y volver a montar el montaje (verde) con la rutina descrita en este informe, y una corrección realizada con los parámetros anteriormente utilizados (rojo) a partir del espectro de fase.

La variación máxima de BFS (obtenido a partir del espectro en fase) para la misma medida, y 5 correcciones IQ distintas realizadas en distintos momentos, con la rutina descrita en este informe, sin haber desmontado el montaje; es 0,3 MHz.

En el caso de haber desmontado el informe y haberlo montado de nuevo es de 2 MHz (Véase figura 9.14).

Por todo ello se considera que el sistema es estable en el tiempo, si no se desmonta, en caso de desmontarse y volverse a montar, se recomienda realizar una nueva calibración IQ.

- Traza BOTDA corregida con nuevos y antiguos parámetros.

Traza BOTDA con parámetros antiguos vs Traza BOTDA con parámetros nuevos

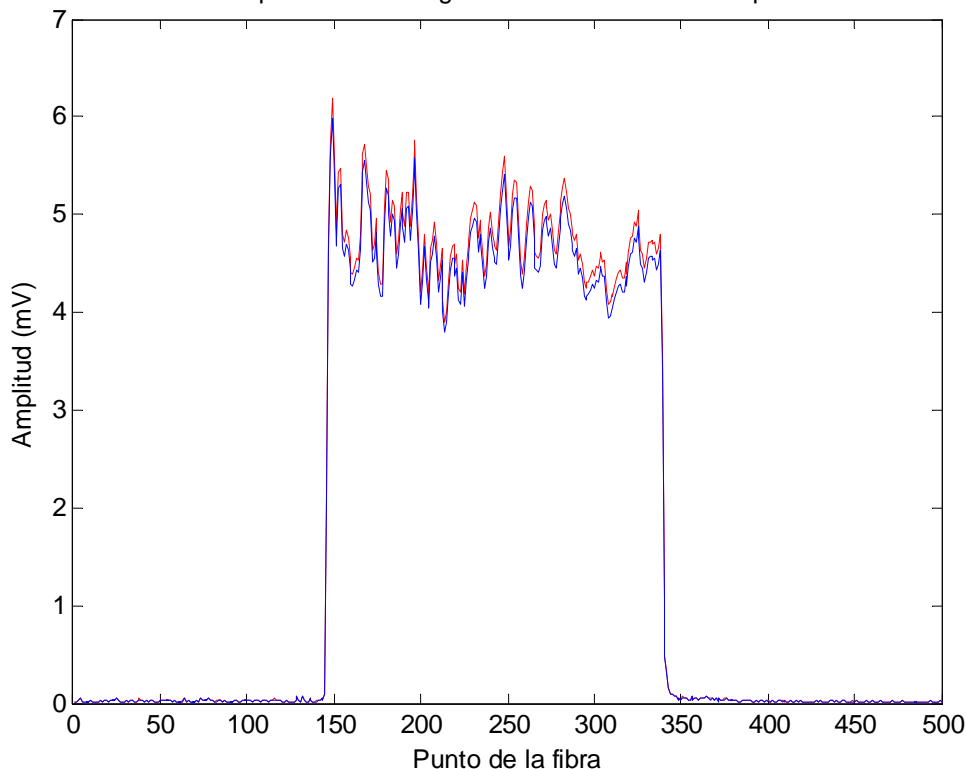


Figura 9.15. Traza BOTDA obtenida en una medida corregida con los parámetros de corrección antiguos (azul), y traza obtenida en la misma medida corregida con la rutina descrita en este informe (rojo).

Los resultados reflejan una correcta corrección IQ.

CONCLUSIÓN

- Se ha automatizado el proceso de cálculo de parámetros de corrección IQ.
- Los nuevos parámetros de corrección proporcionan un mejor ajuste de la función (Véase ANEXO I) y una mayor amplitud en el espectro de amplitud BOTDA, por lo que se mejora la SNR del sistema.
- Eventualmente, en frecuencias por debajo de los 300 MHz, la corrección IQ puede resultar incorrecta (Véase AnexoII).
- El sistema parece estable en el tiempo en caso de no desmontarse, si se desmonta y se vuelve a montar conviene realizar una nueva calibración.
- En caso de desmontar el prototipo sensor y volver a montarlo sin hacer una calibración IQ, las medidas posteriores pueden incluir un error en el BFS de hasta 2 MHz. Muy a tener en cuenta puesto que se busca una precisión en las medidas de 1 MHz.

Capítulo 10

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Se ha concluido este proyecto satisfactoriamente, a continuación se exponen las conclusiones obtenidas durante la realización del mismo.

Se ha conseguido realizar un programa que mantiene el modulador electro óptico muy cerca del punto de mínima transferencia de manera autónoma y automática. El programa se ha utilizado exitosamente y sin errores durante cuatro meses y despreocupa al equipo de trabajo de una labor tediosa y repetitiva, así que el resultado es muy satisfactorio. Los equipos más adelantados en el tema sitúan los moduladores en el punto óptimo mediante el espectro de la señal.

Se ha realizado un test de fiabilidad de las medidas de strain proporcionadas por el prototipo de sistema sensor BOTDA comparándolo con un sistema puntero del mercado y el resultado ha sido muy positivo. Las medidas proporcionadas por los espectros de amplitud son correctas. Las medidas proporcionadas por los espectros de fase no son correctas porque dan valores de strain inferiores, pero teniendo en cuenta de que este tipo de medidas son pioneras, los valores no están tan alejados de los que se deberían obtener estos son superiores al 92% del valor real de strain aplicado. Se ha descubierto que el equipo LUNA esporádicamente y sin razón aparente da como resultado valores erróneos de strain.

A continuación se ha tratado de cuantificar el desfase absoluto causado por el estiramiento de una zona de la fibra. Es un tema importante ya que el no cuantificarlo daría lugar a medidas erróneas. El método de cuantificación ha sido el correcto, sin embargo, no se ha logrado cuantificar. Aunque se ha detectado no se ha cuantificado correctamente, ya que hay demasiada dispersión en las medidas aunque se ha obtenido un valor, se considera que este no es representativo de la medida. Para pruebas posteriores, se propone fijar mayor tramo de fibra, (3 metros) y así poder aplicar una mayor elongación, suficiente para ser cuantificada por el sistema sensor (4500 μ m) sin que resulte dañada la fibra sensora.

A la hora de realizar el estudio de la ortogonalidad obtenida con los módulos DGD, las medidas han sido las más difíciles de realizar. El hecho de variar la polarización de la luz con un polarizador al mismo tiempo que el DGD la está variando, y tener que llegar al máximo nivel de supresión sin saber cuál es, convierte dicho estudio en una labor de precisión y responsabilidad máximas. Las medidas se han repetido innumerables veces para conseguir un resultado fiable y así se considera. La incorporación del nuevo DGD reducirá a la mitad el tiempo de medida, con lo cual este estudio influye directamente sobre la mejora del prototipo sensor.

La proposición de un método de calibración para el preamplificador SR445A DC-350 MHz ha sido un trabajo bonito ya que ha consistido principalmente en proponer un montaje con instrumentos y dispositivos alternativos a los equipos y montajes que propone la casa. Ha sido un reto muy entretenido y satisfactorio por haber sido

10. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

superado. Para calibraciones futuras se propone repetir este método ya que se considera correcto.

Tras ello se ha realizado un documento descriptivo de la metodología de manejo del prototipo sensor en desarrollo. Se ha realizado una vez dominado el sistema de medida. Ha sido un trabajo meticuloso ya que son unas instrucciones para personas que no hayan manejado el sistema nunca. Hasta la fecha no lo ha utilizado nadie así que me quedo con ganas de saber si el manual tiene algún punto débil.

La caracterización de la saturación del EDFA ha sido un trabajo correcto y sencillo, en el cual se concluye que el EDFA cumple con creces las necesidades de amplificación del sistema puesto que no se precisa un intervalo entre pulsos inferior a 100 μ s, momento en el que decae su rendimiento.

La calibración IQ ha sido el colofón de este proyecto. El objetivo de la calibración IQ era automatizar el proceso de calibración y se ha conseguido. Pero se ha ido más allá y se ha mejorado el método de calibración puesto que se ha hecho un estudio de la señal, que no se había hecho antes. De este estudio se ha deducido una señal teórica más aproximada a la señal medida, con lo cual el ajuste de la señal teórica a la medida es más preciso y de ahí se obtienen parámetros de medida más precisos que los que se obtenían hasta ahora. Se considera que se ha mejorado la señal final BOTDA con dicho estudio. Con vista al futuro, se recomienda realizar calibraciones IQ cada vez que se desmonte el prototipo y se vuelva a montar, de lo contrario se acumulará error en las medidas, por lo tanto, el error derivado de la corrección IQ es un tema a solucionar.

Como impresión general, este proyecto ha sido un reto ya que hasta la fecha no había tenido ningún tipo de contacto con la fibra óptica. Todo lo que he hecho ha sido nuevo, con lo cual ha sido muy didáctico. El hecho de haber sido capaz de realizar los trabajos encomendados, y con ello mejorar el prototipo sensor BOTDA hace que lo considere un reto superado.

ANEXO I

Suceso relativo al intervalo entre pulsos

En el transcurso del estudio, se ha tratado de caracterizar el comportamiento del sistema sensor para un tiempo de separación entre pulsos similar al tiempo que tarda la luz en atravesar la fibra sometida a estudio. El resultado ha sido novedoso ya que la traza BOTDA se reduce al mínimo en este punto.

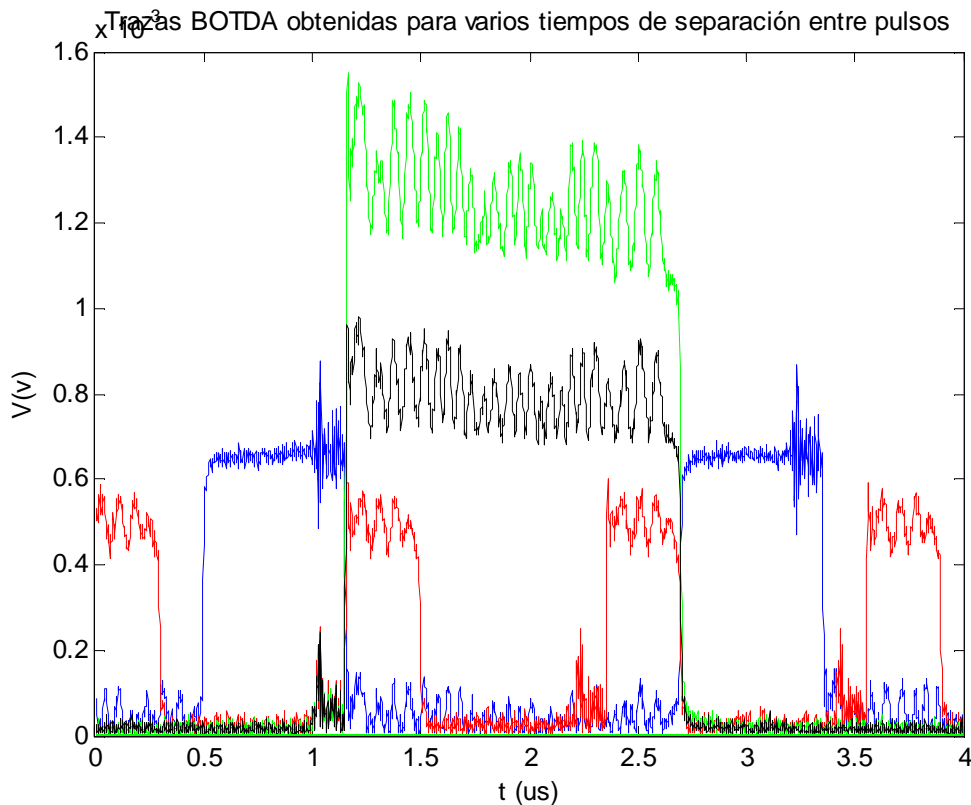


Figura AI.1. Trazas BOTDA obtenidas para arios tiempos de separación entre pulsos. 300 μs (verde), 3 μs (negro), 2 μs (azul), 1 μs (rojo).

En la figura 3 se ven varias trazas BOTDA obtenidas para distintos tiempos de separación entre pulsos.

La fibra en la que se han realizado las medidas tiene una longitud de 200m.

La longitud que recorre la luz en la fibra en cierto tiempo es:

$$L = \frac{1}{2} \times (v \times t) = \frac{1}{2} \times \left(\frac{c \times t}{n} \right)$$
 para n =índice de refracción de la fibra, t =tiempo y c es la velocidad de la luz en el vacío.

Para $L=200m$ la luz tarda en recorrer la fibra utilizada 2 μs aproximadamente. Se deduce que para una separación temporal entre pulsos aproximadamente igual al tiempo que tarda la luz en recorrer la fibra a sensor, la mayor parte de la energía no pasa por la fibra, o pasa en contrafase.

A partir de una separación entre pulsos igual o inferior al tiempo que tarda la luz en recorrer la fibra, la traza BOTDA obtenida no es correcta para el sistema sensor.

CONCLUSIÓN

- Para una separación temporal entre pulsos aproximadamente igual al tiempo que tarda la luz en recorrer la fibra a sensar, la mayor parte de la energía no pasa por dicha fibra, o pasa en contrafase.
- A partir de una separación entre pulsos igual o inferior al tiempo que tarda la luz en recorrer la fibra, la traza BOTDA obtenida no es correcta para el sistema sensor.

ANEXO II

Estudio de la fase de la señal RF y de la influencia de los armónicos en el proceso de calibración y corrección IQ

ESTUDIO DEL AJUSTE DE UNA SEÑAL TEÓRICA A LA SEÑAL MEDIDA

Se ha capturado una traza $x_1(t)$ y se ha ajustado a diferentes funciones teóricas, resultando $x_R(t)$. Después se ha calculado la diferencia entre ambas señales, se ha calculado la media de las diferencias, así como su desviación típica, los resultados son los siguientes:

Función teórica	Media de las diferencias	Desviación típica
$A_1 \cos(2\pi F_0 t + \varphi_1) + \text{Offset}$	$1,14 \times 10^{-16}$	$2,78 \times 10^{-5}$
$A_1 \cos(2\pi F_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2 \times 2\pi F_0 t + \varphi_2) + \text{Offset}$	$2,31 \times 10^{-14}$	$2,72 \times 10^{-5}$
$A_1 \cos(2\pi F_0 t + \varphi_1) + A_3 \cos(3 \times 2\pi F_0 t + \varphi_3) + \text{Offset}$	$3,31 \times 10^{-17}$	$1,80 \times 10^{-5}$
$A_1 \cos(2\pi F_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2 \times 2\pi F_0 t + \varphi_2) + A_3 \cos(3 \times 2\pi F_0 t + \varphi_3) + \text{Offset}$	$4,29 \times 10^{-18}$	$1,7 \times 10^{-5}$

Tabla AII.1. Estudio del ajuste de la señal teórica a la señal medida.

La función teórica:

$$A_1 \cos(2\pi F_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2 \times 2\pi F_0 t + \varphi_2) + A_3 \cos(3 \times 2\pi F_0 t + \varphi_3) + \text{Offset}$$

Es la que mejor ajusta $x_R(t)$ a $x(t)$.

Los armónicos de la frecuencia principal nos ayudan a definir de mejor manera la amplitud y la fase de la frecuencia principal.

ANEXO II.

Estudio de la fase de la señal RF y de la influencia de los armónicos en el proceso de calibración y corrección IQ

ESTUDIO DE LA FASE DE LA SEÑAL MEDIDA

A partir del estudio del ajuste de la señal medida a una señal teórica, se ha ajustado $x_1(t)$ a la función: $A_1 \cos(2\pi F_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2 \times 2\pi F_0 t + \varphi_2) + A_3 \cos(3 \times 2\pi F_0 t + \varphi_3) + \text{Offset}$

mediante el comando `nlinfit` de Matlab.

Este ajuste nos ha proporcionado los valores de fase φ_1 , φ_2 y φ_3 correspondientes a las frecuencias F_0 , $2F_0$, $3F_0$ respectivamente.

Estos valores se han representado en la figura 9.15.

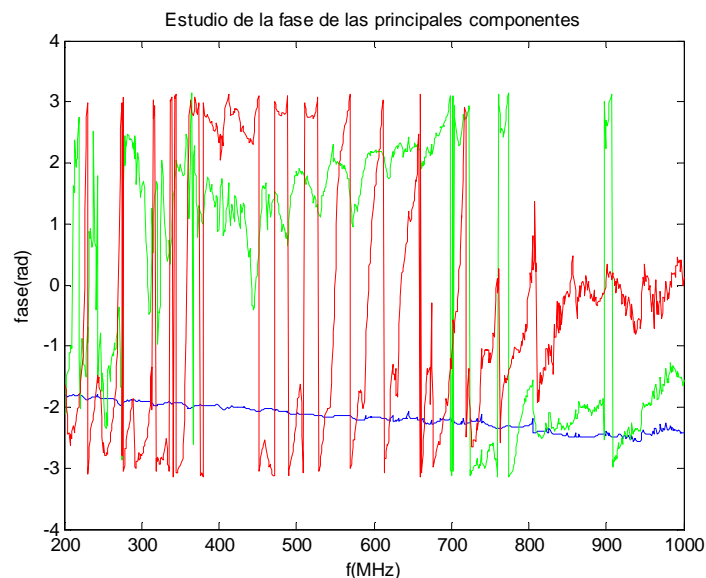


Figura AII.1. Fase de las componentes frecuenciales de 10kHz (azul), 20kHz (verde), 30kHz (rojo), para distintas frecuencias de RF.

En la figura se ve que la fase de la frecuencia fundamental 10kHz es constante, no así para las frecuencias de 20kHz y 30 kHz.

Por este motivo se decide corregir únicamente la principal componente frecuencial (10kHz). Conocer la amplitud y la fase de sus dos primeros armónicos permitirá aumentar la precisión de ajuste de la amplitud y fase de la componente principal.

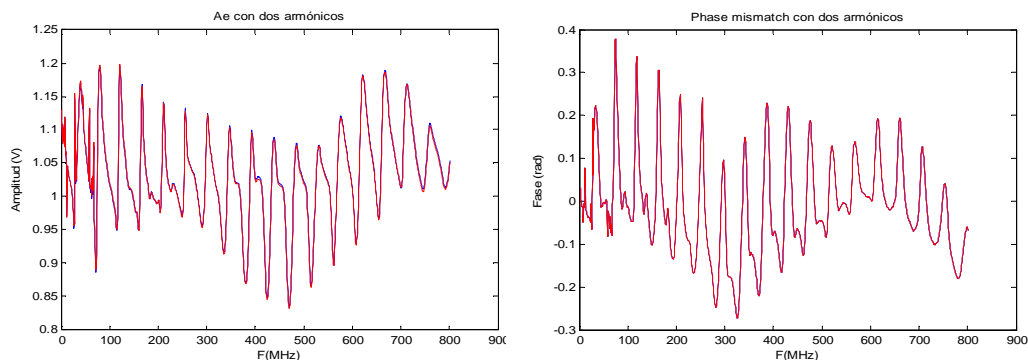


Figura AII.2. Ae y Phase mismatch calculado corrigiendo la frecuencia fundamental (Rojo) y corrigiendo la frecuencia fundamental más dos armónicos (azul).

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UTILIZACIÓN DE LOS ARMÓNICOS COMO PARÁMETROS DE AJUSTE EN LA CORRECCIÓN IQ

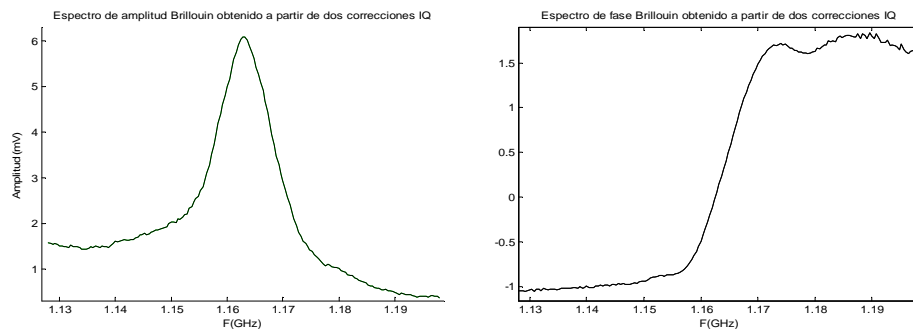


Figura AII.3. Espectro en amplitud (izqda.) y fase (dcha.) calculado corrigiendo la frecuencia fundamental y corrigiendo la frecuencia fundamental más dos armónicos.

Aunque haya diferencias en el Ae obtenido para zero armónicos y dos armónicos, los espectros BOTDA obtenidos a partir d ambas correcciones son idénticos.

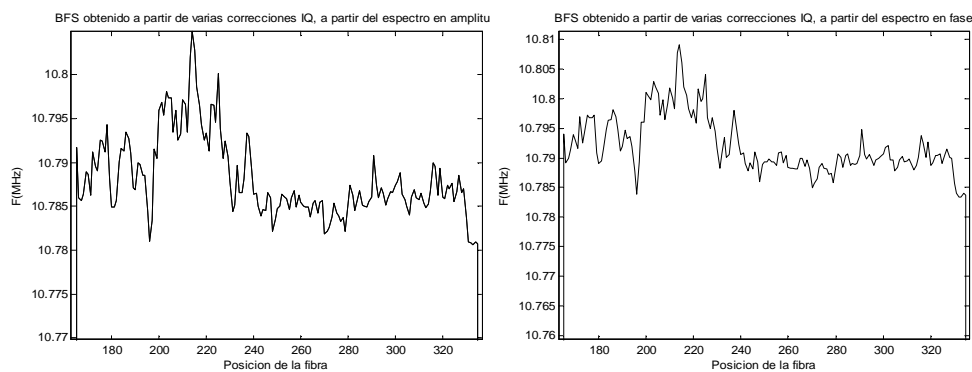


Figura AII.4. BFS obtenido a partir del espectro de amplitud (izqda.) y BFS obtenido a partir del espectro de fase (dcha.) calculado corrigiendo la frecuencia fundamental y corrigiendo la frecuencia fundamental más dos armónicos.

Aunque haya diferencias en el Ae obtenido para zero armónicos y dos armónicos, los BFS obtenidos a partir d ambas correcciones son idénticos.

A la hora de corregir la amplitud de la señal BOTDA recibida es indiferente utilizar dichos armónicos, ya que los resultados son idénticos.

ANEXO II.

Estudio de la fase de la señal RF y de la influencia de los armónicos en el proceso de calibración y corrección IQ

CONCLUSIÓN:

- La señal teórica de ajuste será:

$$\text{Offset} + A_1 \cos(2\pi F_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2 \times 2\pi F_0 t + \varphi_2) + A_3 \cos(3 \times 2\pi F_0 t + \varphi_3)$$

- Se decide utilizar los armónicos para el ajuste de la función teórica a la señal medida para obtener resultados más precisos. Esto da un valor de amplitud de la frecuencia principal (10kHz) más correcto que el que se obtenía hasta ahora.
- No se utilizan los armónicos como parámetros de corrección.

ANEXO III

COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE CORRECCIÓN IQ Y CUANTIFICACIÓN DEL ERROR RESTANTE EN LAS SEÑALES TRAS SU CORRECCIÓN

Se ha realizado la calibración IQ de 5 medidas con la rutina anterior y la nueva. Los resultados son los siguientes:

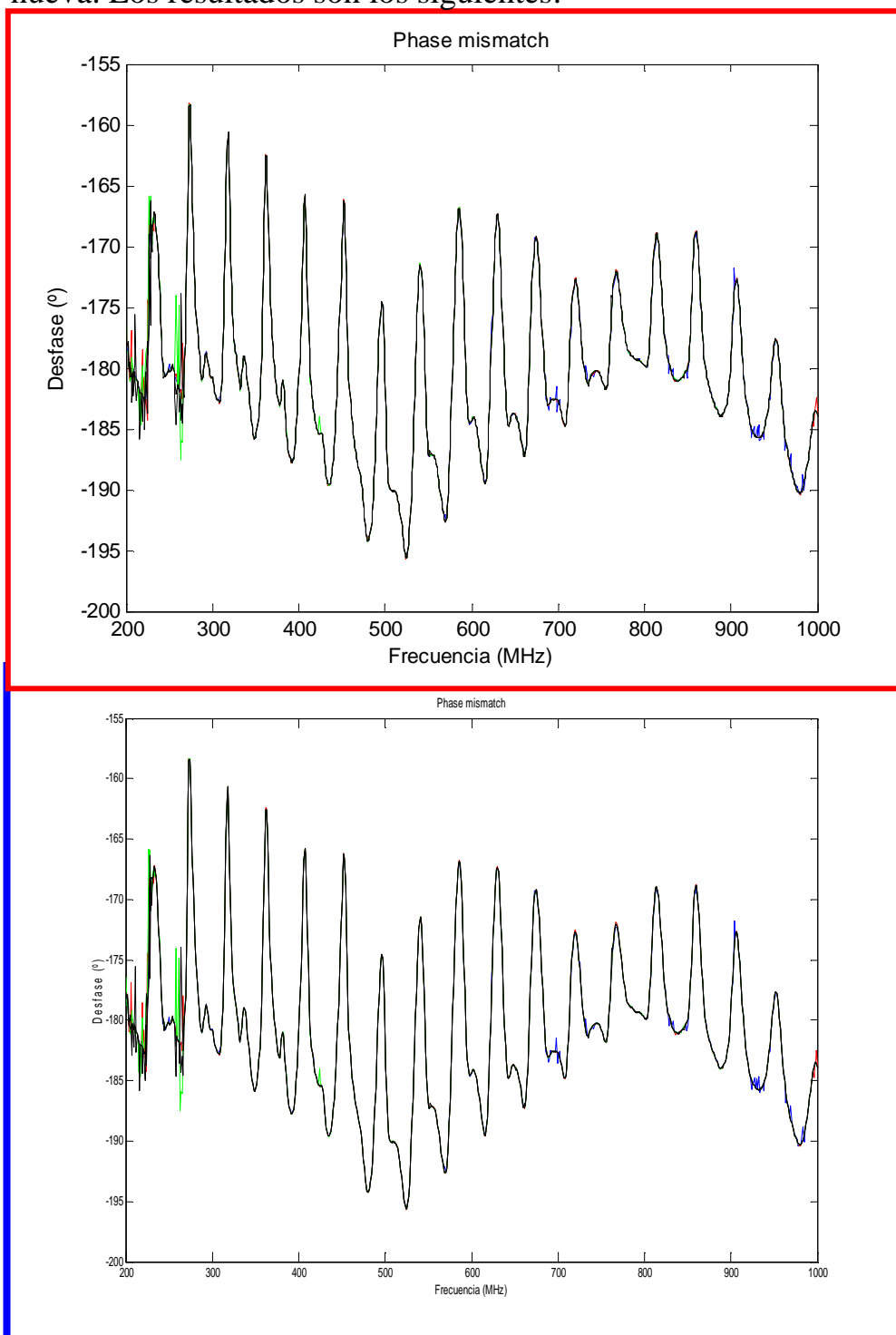


Figura AIII.1 Phase Mismatch obtenido con la rutina antigua (rojo) y con la nueva (azul).

ANEXO III

COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE CORRECCIÓN IQ Y CUANTIFICACIÓN DEL ERROR RESTANTE EN LAS SEÑALES TRAS SU CORRECCIÓN

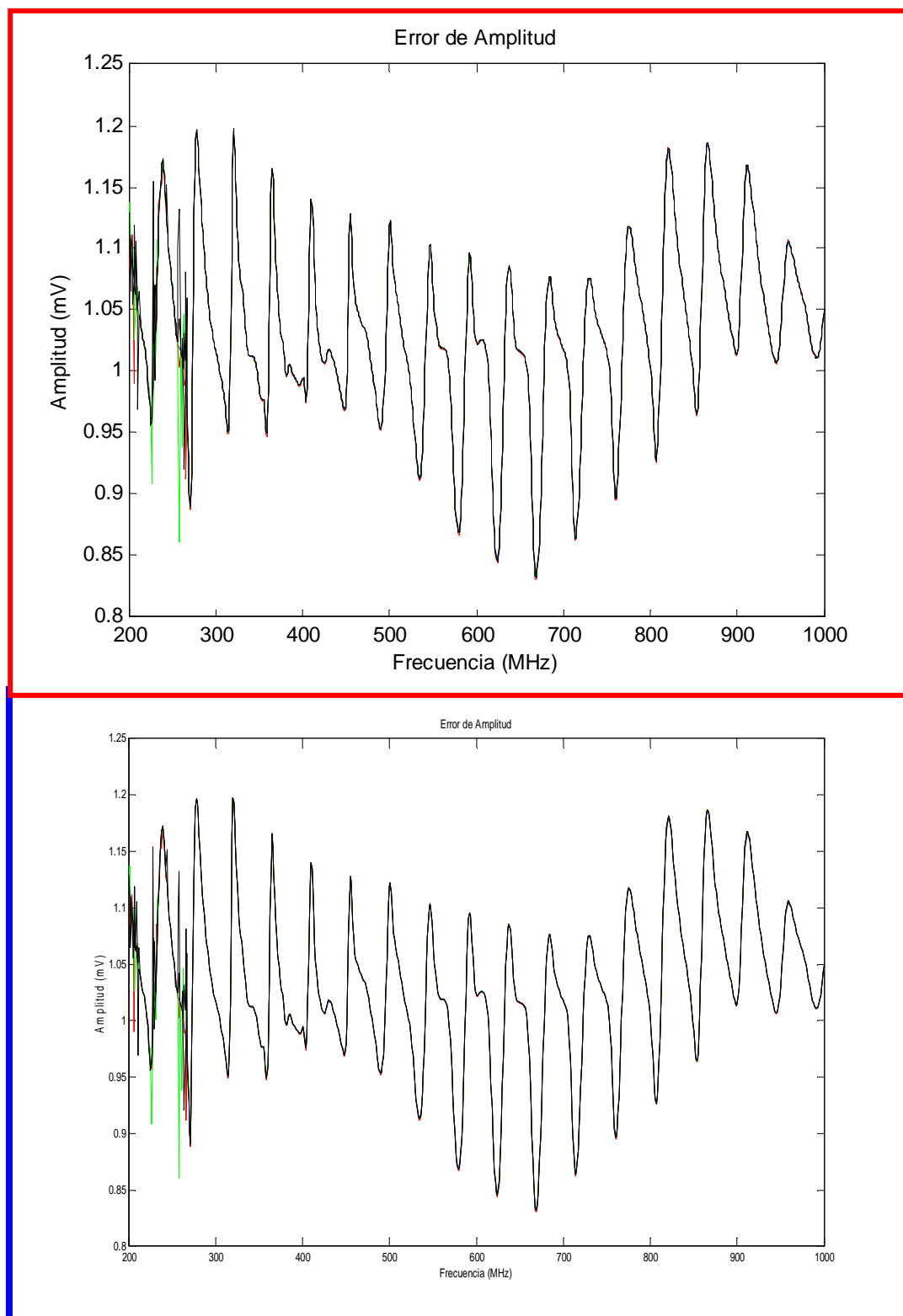


Figura AIII.2. Ae obtenido con la rutina antigua (rojo) y con la nueva (azul).

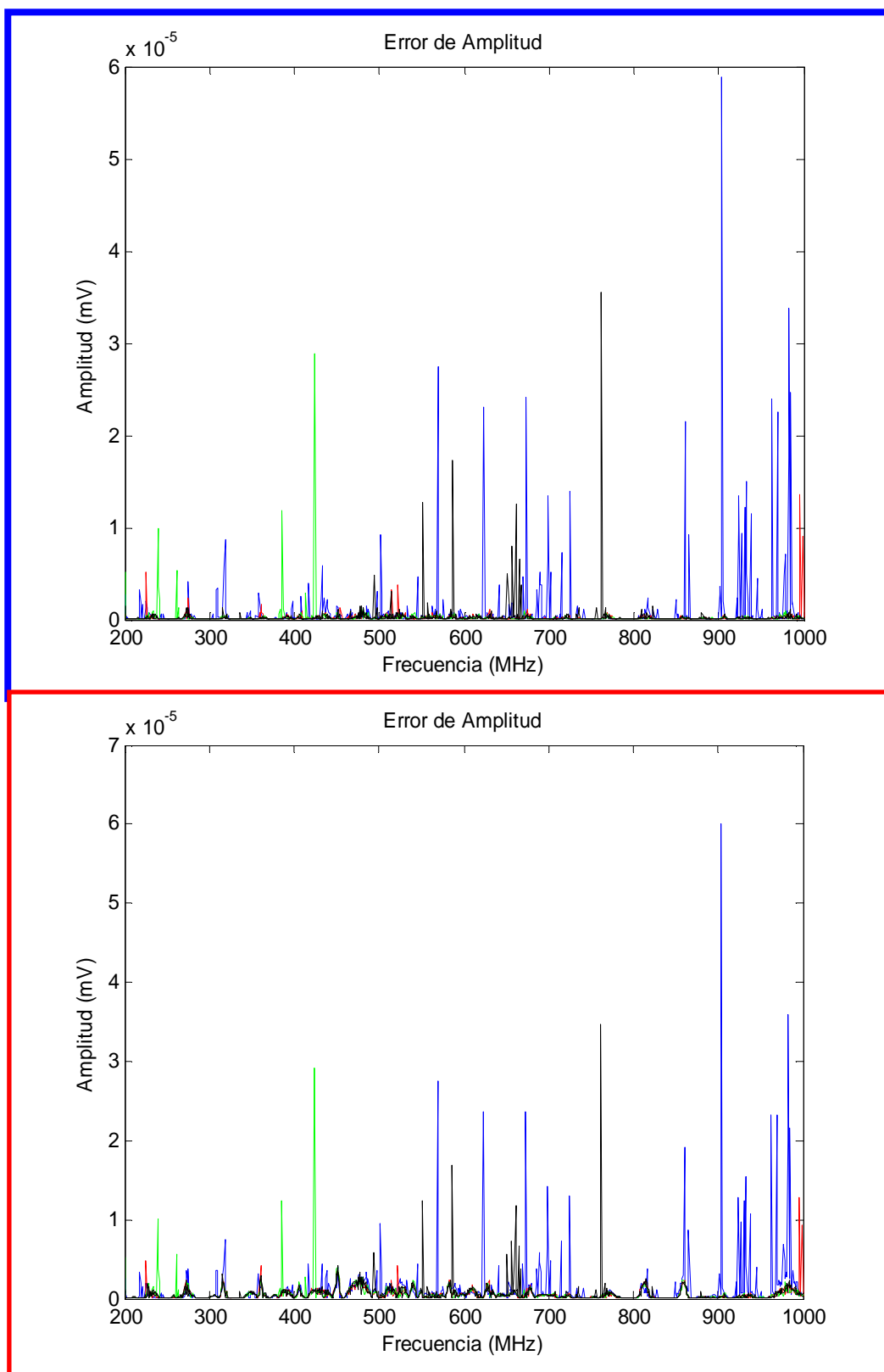


Figura AIII.3 Error final de amplitud restante tras la corrección obtenido con la rutina antigua (rojo) y con la nueva (azul).

ANEXO III

COMPARACIÓN DE PARÁMETROS DE CORRECCIÓN IQ Y CUANTIFICACIÓN DEL ERROR RESTANTE EN LAS SEÑALES TRAS SU CORRECCIÓN

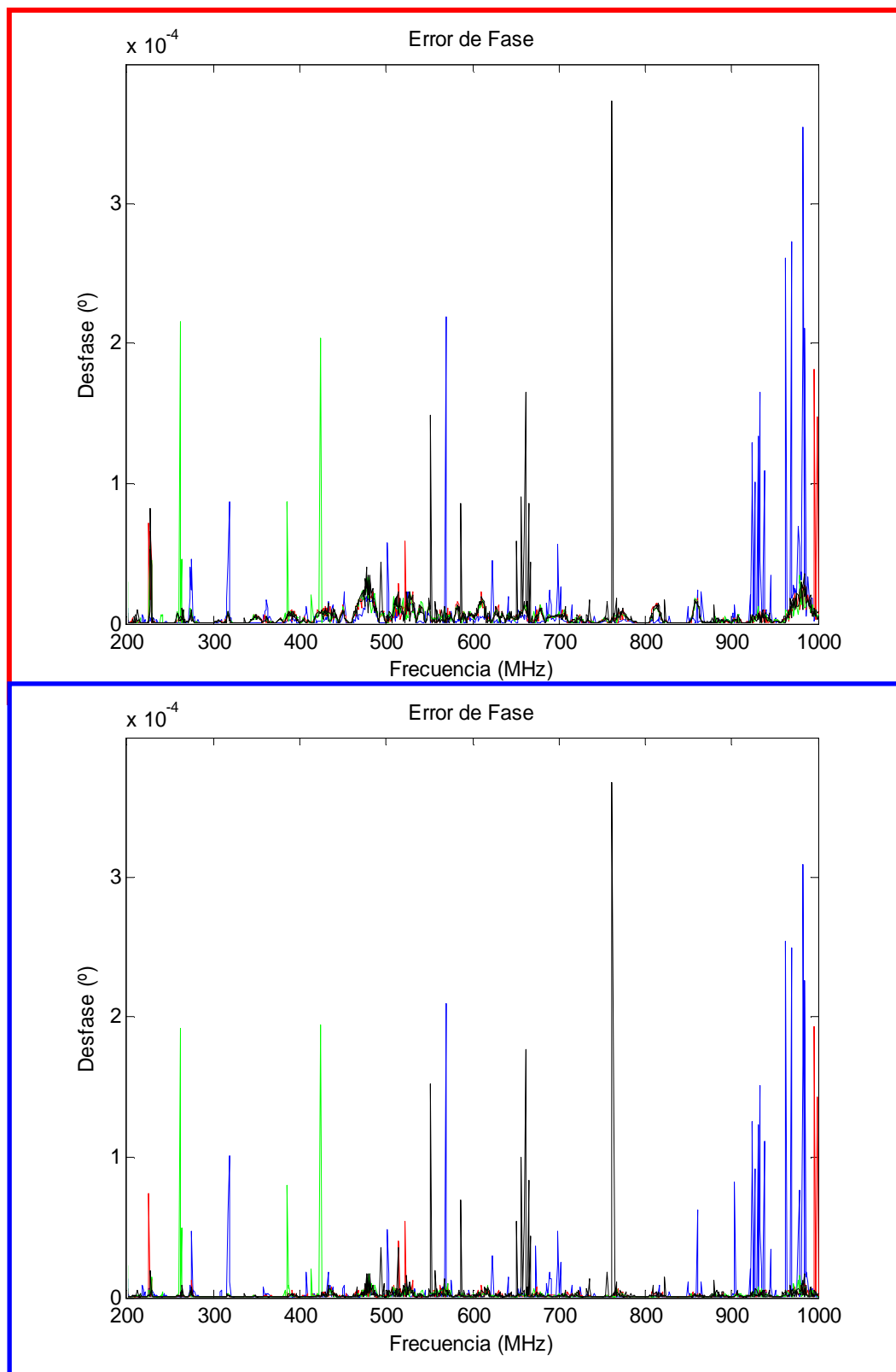


Figura AIII.4 Error final de fase restante tras la corrección obtenido con la rutina antigua (rojo) y con la nueva (azul).

CONCLUSIÓN:

- El error de amplitud restante tras hacer la corrección IQ, A_e , es inferior a 10^{-4} mV.
- El error de fase restante tras hacer la corrección IQ, θ_e , es inferior a 10^{-3} rad.

ANEXO IV RUTINA BIAS CONTROLLER

```
clear all
disp('lanzando BiasController')
esc=0;
Delta_V=0.005;
V_min=0.5;
V_max=9.5;
num_min=0;
T_Ventana=9;
while esc<2

%initialize EDFA object:
edfa=serial('com4','terminator','CR/LF');
fopen(edfa);
%EDFA output power array (of the last 100 scans)
Pot=zeros(1,100);
%initialize the figure where we will plot Pot
P=figure(1);
set(P, 'closerequestfcn', ''); % desactivamos el boton de cerrar de la
figura para evitar problemas derivados de dicha acción.
% set()
ylabel('output power of the EDFA (dBm)')
% Create an analog output object
ao = analogoutput('nidaq','Dev1'); % Ojo para averiguar el si es 'Dev
1' u
% otro hay que utilizar los comandos que estan comentados más arriba
% añadir los dos canales de salida al objeto de salida analógica
addchannel(ao,0:1);
% Definir la frecuencia de muestreo
set(ao,'SampleRate',150); % la maxima frecuencia de salida del USB-
6008 es 150 S/s
% Definir el tipo de disparo
set(ao,'TriggerType','Immediate')
%read the last Bias voltage that was applied
load Bias_inic
%Voltaje=10;
%Button for the plot ("quit")
h=uicontrol('Style','Pushbutton','String','quit','callback','esc=2;');
%Button value for the while loop
esc=0;
b=zeros(1,10);

%En caso de que el Voltaje sea inferior a 2.5v tenderá a aumentar
sentido=1;
if Voltaje<V_min
sentido=-1;
end

%Definimos la ventana
ventana=zeros(1,T_Ventana);
Cont_W=1;%Iniciamos el contador
muestra_repActual=0; %Muestras representativas
muestra_repAnterior=0;
```

```

while esc==0

    try
        %Until we push the "quit" button we won't quit the loop
        %set the output voltage of one channel with the value in the
slider
        putsample(ao,[Voltaje/2 0]);
        muestra='';
        %read the input and output power of the edfa:

        fprintf(edfa,'PH');
        fscanf(edfa);
        out=fscanf(edfa);
        out=regexprep(out, '$\.\.', '\.', 'once');
        if (length(out)>=11)
            outnum=eval(out(7:11));%output power of the EDFA in dBm
        else
            outnum=Pot(1);
        end

        %concatenate and plot
        Pot(2:end)=Pot(1:end-1);
        Pot(1)=outnum;
        plot(Pot);
        ylabel('output power of the EDFA (dBm)');
        drawnow;
        %almacenamos las 20 últimas muestras
        ventana(Cont_W)=outnum;
        Cont_W=Cont_W+1;
        if Cont_W==T_Ventana+1
            Cont_W=1;
            muestra_repAnteriorU=muestra_repAnterior;    %muestra
representativa de hace dos ciclos
            muestra_repAnterior=muestra_repActual;        %muestra
representativa del ciclo anterior
            muestra_repActual=min(ventana);                %extraemos una
muestra representativa de esa ventana

            if muestra_repActual>muestra_repAnterior
                sentido=-sentido;
            end

            Voltaje=Voltaje+sentido*Delta_V;

            if muestra_repActual>muestra_repAnterior &&
muestra_repAnterior<muestra_repAnteriorU
                save Bias_inic Voltaje
                num_min=num_min+1;
                if num_min>2
                    Delta_V=0.002;
                end
            end
        end

        %ENCAPSULAMOS EL WARNING% Warning: A timeout occurred before the
Terminator was reached.
        if outnum<0 || outnum==0 || outnum>100
            esc=1;
            disp('ha habido un Timeout y se ha solucionado')
        end
        %ENCAPSULAMOS EL ERROR%

```

ANEXO IV

RUTINA BIAS CONTROLLER

```
catch exception
    esc=1;
    disp('ha habido un error y se ha solucionado')
end

%ALGORITMO DE PROTECCIÓN
if Voltaje<V_min || Voltaje>V_max
    Voltaje=5;
end

end

%EN CASO DE PERDER COMUNIACION POR UN PUERTO SERIE
delete(instrfindall)
%delete all Instrument Control Toolbox objects.
%Info Puertos instrhwinfo('serial')
delete(P);%Quitamos la figura ya que no se puede cerrar al haber
deshabilitado esa opción
% close and Clean
load Bias_inic
putsample(ao,[Voltaje/2 0]); % al salir del programa siempre se carga
el último mínimo alcanzado
delete(ao);
fclose(edfa);
delete(edfa)
close
end
```


ANEXO V RUTINA CALIBRACIÓN IQ

```
clear all
%% PARÁMETROS DE DEFINICIÓN DE LAS MEDIDAS

Amp_inic=-20;%Amplitud de inicio de barrido dB
Amp_fin=-10; %Amplitud de final de barrido dB
Amp_step=5; %salto de amplitud dB

f_inic=200; %frecuencia de inicio de barrido MHz
f_fin=1000; %frecuencia de final de barrido MHz
f_step=1; %salto de frecuencia MHz

%%Parámetros iniciales%%
HoraMedida=LabfotHora; %Capturo la hora de la medida
%Nombre para guardar las trazas
nombre=['param_correccion_' HoraMedida
'_m15dBmol_sinModAmpl_15dBmHolz_Tek_CAJA'];
nombreTodo=[nombre '_Todo'];
nombreTrazas=[nombre '_Trazas'];

%% INICIALIZACIÓN DE INSTRUMENTOS %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Inicialización del osciloscopio%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Direccion GPIB del osciloscopio Tektronix:
% Crea el objeto GPIB.
oscilloscope=instrfind('Type','gpiib','BoardIndex',0,'PrimaryAddress',7
,'Tag','');
% Si ya existía se conecta al existente
if isempty(oscilloscope)
    oscilloscope = gpib('CONTEC', 0, 7);
else
    fclose(oscilloscope);
    oscilloscope = oscilloscope(1);
end
n1=get(oscilloscope,'InputBufferSize');
n2=get(oscilloscope,'OutputBufferSize');
if n1~=50000
    set(oscilloscope,'InputBufferSize',50000);
end
if n2~=50000
    set(oscilloscope,'OutputBufferSize',50000);
end
%Abre el dispositivo
fopen(oscilloscope);

%Ejes de tiempo y amplitud para el canal 1:
fprintf(oscilloscope,'DAT:SOU CH1');
fprintf(oscilloscope,'WFMP:YMU?');
vertch1=str2double(fscanf(oscilloscope));
fprintf(oscilloscope,'WFMP:YOF?');
offsetch1=str2double(fscanf(oscilloscope));
fprintf(oscilloscope,'CH1:OFFS?');
offsetmvch1=str2double(fscanf(oscilloscope));
fprintf(oscilloscope,'WFMP:XIN?');
tincr=str2double(fscanf(oscilloscope));
```

```

%Ejes de tiempo y amplitud para el canal 2:
fprintf(oscilloscope,'DAT:SOU CH2');
fprintf(oscilloscope,'WFMP:YMU?');
vertch2=str2double(fscanf(oscilloscope));
fprintf(oscilloscope,'WFMP:YOF?');
offsetch2=str2double(fscanf(oscilloscope));
fprintf(oscilloscope,'CH2:OFFS?');
offsetmvch2=str2double(fscanf(oscilloscope));

fprintf(oscilloscope,'WFM0:ENC ASC');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Conexión con el rhode schwarz smt02%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
smt02=serial('com8','terminator','CR/LF');
%En distintos ordenadores el puerto puede que no sea el com 8
%en tal caso buscar el puerto a través de matlab ejecutando: tmttool
fopen(smt02);
fprintf(smt02,'SOUR:FREQ:CW 200MHZ');%Establecer frecuencia
fprintf(smt02,'SOUR:POW:LEV -15'); %Establecer potencia en dB
fprintf(smt02,'OUTP:STAT ON'); %RF ON
opc=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Conexión con el holzworth modular %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if libisloaded('HS1001')==1,
    disp('HS1001 Library is Loaded');
end
if libisloaded('HS1001')==0,
    disp('Loading Library...');
    loadlibrary HolzworthHS1001.dll HolzworthHS1001.h alias HS1001
    n=calllib('HS1001','openDevice','194');
    if n==0, disp('Error Opening HS1001');end
    if n==1, disp('HS1001 is open');end
end
calllib('HS1001','setPower','194',150);%POTENCIA 15dB
calllib('HS1001','setFrequencyS','194','20101000000');
calllib('HS1001','RFPowerOn','194');

%% INICIALIZACIÓN DE LAS MEDIDAS %%

Amp=Amp_inic:Amp_step:Amp_fin;
f=f_inic:f_step:f_fin;
ch1=zeros(length(f),5000,length(Amp));
ch2=zeros(length(f),5000,length(Amp));
h=0;
for A=Amp
    h=h+1;
    Astring=int2str(A);
    amplitude=['SOUR:POW:LEV ',Astring];
    fprintf(smt02,amplitude);
    pause(1);
j=0;
for i=f
    j=j+1;
    frequency=int2str(i*1000000000+10000000);
    n=calllib('HS1001','setFrequencyS','194',frequency);

```

ANEXO V

RUTINA DE CALIBRACIÓN IQ

```

if n==0, disp('Error setting frequency in HS1001');end

%acquisition mode
fprintf(oscilloscope, 'ACQ:MOD AVE');
% number_of_averages='32';
fprintf(oscilloscope, 'ACQ:NUMAV 64');
opc=0;
while opc==0
    fprintf(oscilloscope, '*OPC?');
    opc=str2double(fscanf(oscilloscope));
end
pause(1);
%get data from channel 1:
fprintf(oscilloscope, 'DAT:SOU CH1');
fprintf(oscilloscope, 'CURV?');
datach1=fscanf(oscilloscope, '%s', 5000000);
numch1=str2num(regexprep(datach1, ',', ' '));

%get data from channel 2:
fprintf(oscilloscope, 'DAT:SOU CH2');
fprintf(oscilloscope, 'CURV?');
datach2=fscanf(oscilloscope, '%s', 5000000);
numch2=str2num(regexprep(datach2, ',', ' '));

voltch1=(numch1-offsetch1)*vertch1+offsetmvch1;
voltch2=(numch2-offsetch2)*vertch2+offsetmvch2;
time1=(0:1:(length(voltch1)-1))*tincr;
time2=(0:1:(length(voltch2)-1))*tincr;
plot(time1,voltch1,'r',time2,voltch2,'b');drawnow;

ch1(j,:,h)=voltch1;
ch2(j,:,h)=voltch2;

fprintf(smt02, ['SOUR:FREQ:CW ' int2str(i+f(2)-f(1)) ' MHZ']);
opc=0;

end
fprintf(smt02, 'OUTP:STAT OFF');
pause(2)
fprintf(smt02, 'OUTP:STAT ON');
pause(2)
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%555
% Cierro los instrumentos
n=calllib('HS1001', 'RFPowerOff', '194');
fprintf(smt02, 'OUTP:STAT OFF');
fclose(smt02);
fclose(oscilloscope);

%% Guardo las trazas de la medición
save(nombreTrazas);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```



```

%% PARTE 1: OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE AJUSTE  %%%%%%%%%%%%%%%

%%% AJUSTE DE LA SEÑAL TEÓRICA funcion2 A LA SEÑAL MEDIDA %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Variables que require en el workspace
%
% f array que contiene las frecuencias para las que se hace el fit
% ch1(i,:) traza temporal capturada en canal 1
% ch2(i,:) traza temporal capturada en canal 1
% time1 array que contiene los tiempos de la traza del canal 1
% time2 array que contiene los tiempos de la traza del canal 2
% tincr período de muestreo
%
% Valores iniciales para Fit

% Definicion a cero de arrays para aumentar velocidad
offset1=zeros(1,length(f));
Amplitud1=zeros(1,length(f));
Amplitud1_2=zeros(1,length(f));
Amplitud1_3=zeros(1,length(f));
fase1=zeros(1,length(f));
fase1_2=zeros(1,length(f));
fase1_3=zeros(1,length(f));
freq1=zeros(1,length(f));
f1=zeros(length(f),length(time1));
offset2=zeros(1,length(f));
Amplitude2=zeros(1,length(f));
Amplitude2_2=zeros(1,length(f));
Amplitude2_3=zeros(1,length(f));
fase2=zeros(1,length(f));
fase2_2=zeros(1,length(f));
fase2_3=zeros(1,length(f));
freq2=zeros(1,length(f));
f2=zeros(length(f),length(time1));
vstart1=[];
vstart2=[];
I=zeros(length(f),length(Amp));
Ifase=zeros(length(f),length(Amp));
Ifase_2=zeros(length(f),length(Amp));
Ifase_3=zeros(length(f),length(Amp));
IAmp=zeros(length(f),length(Amp));
IAmp_2=zeros(length(f),length(Amp));
IAmp_3=zeros(length(f),length(Amp));
Ioffset=zeros(length(f),length(Amp));
Ifreq=zeros(length(f),length(Amp));
Q=zeros(length(f),length(Amp));
Qfase=zeros(length(f),length(Amp));
Qfase_2=zeros(length(f),length(Amp));
Qfase_3=zeros(length(f),length(Amp));
Qamp=zeros(length(f),length(Amp));
Qamp_2=zeros(length(f),length(Amp));
Qamp_3=zeros(length(f),length(Amp));
Qoffset=zeros(length(f),length(Amp));
Qfreq=zeros(length(f),length(Amp));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%PARÁMETROS PARA LA REALIZAR LA FFT
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ts =tincr; % Período de muestreo de la señal
Fs = 1/Ts; % Frecuencia de muestreo de la señal

```

ANEXO V

RUTINA DE CALIBRACIÓN IQ

```

L = length(time1); % Longitud de la ventana
t = (0:L-1)*Ts; % Vector de tiempo
freq = Fs/2*linspace(0,1,L/2+1); % Vector de frecuencias barridas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear A;
for A=1:length(Amp)

    %%%CÁLCULO DEL DESFASE ENTRE CH1 Y CH2 PARA UTILIZARLO COMO
    PARÁMETRO DE
    %%%ENTRADA AL FIT
    clear x X XA picosx idxx Px y Y YA picosy idxy Py
    clear F1 A1 P1 A2 A3 P2 P3 vstart1 vstart2
    x = squeeze(ch1(1,1:L,A));
    X = fft(x,L)/L;
    XA=abs(X(1:L/2+1));
    y = squeeze(ch2(1,1:L,A));
    Y = fft(y,L)/L;YA=abs(Y(1:L/2+1));
    [picosx,idxx]=max(XA);
    Px=angle(X(idxx(1)));
    [picosy,idxy]=max(YA);
    Py=angle(Y(idxy(1)));
    desfase=Px-Py;

    %%%DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE INICIALIZACIÓN DEL FIT
    F1=freq(idxx(1));
    A1=2*picosx(1);
    P1=angle(X(idxx(1)));
    A2=A1*0.067;
    A3=A2*0.5074;
    P2=0;
    P3=0;
    vstart1=[0,A1,F1,P1,A2,A3,P2,P3];
    vstart2=[0,A1,F1,P1+desfase,A2,A3,P2,P3];

    for i=1:length(f) % Para todas las frecuencia

        %Ajuste a la señal medida en el canal 1
        %t = tiempo
        %ch1(i,1:L,A)= señal medida
        %funcion2 = nuestra señal teórica
        %vstart = Parámetros de inicialización
        vEnd_ch1=nlinfit(t,squeeze(ch1(i,1:L,A)),@funcion2,vstart1,statset('MaxIter',300));
        fl(i,1:L)=funcion2(vEnd_ch1,t); % Guardo la traza con Fit del canal 1

        offset1(i)=vEnd_ch1(1); % Guardo offset y el resto de
    parametros
        Amplitudel(i)=vEnd_ch1(2);
        freq1(i)=vEnd_ch1(3);
        fase1(i)=vEnd_ch1(4);
        Amplitudel_2(i)=vEnd_ch1(5);
        Amplitudel_3(i)=vEnd_ch1(6);
        fase1_2(i)=vEnd_ch1(7);
        fase1_3(i)=vEnd_ch1(8);

    %Si la amplitud es negativa, la covertimos en positiva cabiando el
    signo a
    %la amplitud y restando pi a la fase

```

```

    if Amplitud1(i)<0
        Amplitud1(i)=-Amplitud1(i);
        fase1(i)=fase1(i)-pi;
    end

vstart1=vEnd_ch1; %el vector de finalización será
%el vector de inicialización en la siguiente iteración

%Ajuste a la señal medida en el canal 2
%misimos pasos que para el canal 1
vEnd_ch2=nlinfit(t,squeeze(ch2(i,1:L,A)),@funcion2,vstart2,statset('Ma
xIter',300));
f2(i,1:L)=funcion2(vEnd_ch2,t);

        offset2(i)=vEnd_ch2(1); % Guardo offset y el resto de
parametros
        Amplitude2(i)=vEnd_ch2(2);
        freq2(i)=vEnd_ch2(3);
        fase2(i)=vEnd_ch2(4);
        Amplitude2_2(i)=vEnd_ch2(5);
        Amplitude2_3(i)=vEnd_ch2(6);
        fase2_2(i)=vEnd_ch2(7);
        fase2_3(i)=vEnd_ch2(8);

    if Amplitude2(i)<0
        Amplitude2(i)=-Amplitude2(i);
        fase2(i)=fase2(i)-pi;
    end

vstart2=vEnd_ch2;
plot(t,f2(i,1:L),'r',t,ch2(i,1:L,A),'g',t,f1(i,1:L),'b',t,ch1(i,1:L,A)
,'c');drawnow

end

%Identificacion de canal I=ch2 y canal Q=ch1 deacuerdo a la
correccion en el
%programa BOTDA_Tektronix.
    %I(i,: ,A)=squeeze(ch2(i,1:L,A));
    Ifase(: ,A)=squeeze(fase2(1,:));
    Ifase_2(: ,A)=squeeze(fase2_2(1,:));
    Ifase_3(: ,A)=squeeze(fase2_3(1,:));
    IAmp(: ,A)=squeeze(Amplitude2(1,:));
    IAmp_2(: ,A)=squeeze(Amplitude2_2(1,:));
    IAmp_3(: ,A)=squeeze(Amplitude2_3(1,:));
    Ioffset(: ,A)=squeeze(offset2(1,:));
    Ifreq(: ,A)=squeeze(freq2(1,:));
    Ifit=f2;
    Ivstart=vEnd_ch2;

    %Q(: ,A)=squeeze(ch1(i,1:L));
    Qfase(: ,A)=squeeze(fase1(1,:));
    Qfase_2(: ,A)=squeeze(fase1_2(1,:));
    Qfase_3(: ,A)=squeeze(fase1_3(1,:));
    QAmp(: ,A)=squeeze(Amplitud1(1,:));
    QAmp_2(: ,A)=squeeze(Amplitud1_2(1,:));
    QAmp_3(: ,A)=squeeze(Amplitud1_3(1,:));
    Qoffset(: ,A)=squeeze(offset1(1,:));
    Qfreq(: ,A)=squeeze(freq1(1,:));
    Qfit=f1;

```

ANEXO V

RUTINA DE CALIBRACIÓN IQ

```

Qvstart=vEnd_ch1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS Ae Y PHASE_MISMATCH%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Escalamos la fase entre 0 y 2pi
while min(Qfase(:,A))<0
    Qfase(:,A)=Qfase(:,A)+2*pi;
end
while min(Ifase(:,A))<0
    Ifase(:,A)=Ifase(:,A)+2*pi;
end
while min(Qfase(:,A))>2*pi
    Qfase(:,A)=Qfase(:,A)-2*pi;
end
while min(Ifase(:,A))>2*pi
    Ifase(:,A)=Ifase(:,A)-2*pi;
end

%Calculamos el error de fase
while mean(Ifase(:,A))>mean(Qfase(:,A)) %Para corregir el canal Q en
función del canal I                    %Ponemos la fase de Q por
    Qfase(:,A)=Qfase(:,A)+2*pi;        encima de la fase de I
end
Phase_Error=Ifase(:,A)-Qfase(:,A)+pi/2; %Phase_mismatch del canal Q
respecto del canal I
if abs(mean(Phase_Error))>1 %Si el desfase es de 3pi/2
    Phase_Error=Ifase(:,A)-Qfase(:,A)+3*pi/2; %Phase_mismatch del canal Q
    respecto del canal I
end

%Calculamos el error de amplitud
Amp_Error=(Qamp(:,A))./(Iamp(:,A));

%% PARTE 2: TEST DE LOS PARÁMETROS %%

% Generacion de las señales a través de los parámetros obtenidos en el
fit
[frequency_scanned, signal_length,amplitude_scanned]=size(ch1);
I1=zeros(frequency_scanned, signal_length);
Q1=zeros(frequency_scanned, signal_length);

for i2=1:1:frequency_scanned
    Iv=[Ioffset(i2,A), Iamp(i2,A), Ifreq(i2,A),
        Ifase(i2,A),Iamp_2(i2,A),Iamp_3(i2,A),Ifase_2(i2,A),Ifase_3(i2,A)];
    Qv=[Qoffset(i2,A), Qamp(i2,A), Qfreq(i2,A),
        Qfase(i2,A),Qamp_2(i2,A),Qamp_3(i2,A),Qfase_2(i2,A),Qfase_3(i2,A)];
    I1(i2,:)=funcion2(Iv,timel);
    Q1(i2,:)=funcion2(Qv,timel);
    %plot(timel, Q1(i2,:), 'k', timel, I1(i2,:), 'k', timel, Q(i2,:), 'b',
    timel, I(i2,:), 'r');drawnow
end

% Correccion IQ de las señales generadas con los parámetros de
corrección
% calculados
I1OK=zeros(length(f),length(timel));

```

```

Q1OK=zeros(length(f),length(time1));
for i3=1:1:801
I1OK(i3,:)=I1(i3,:)-Ioffset(i3);
Q1OK(i3,:)=((I1(i3,:)-Ioffset(i3)).*(-
tan(Phase_Error(i3))))+(Q1(i3,:)-
Qoffset(i3))./(Amp_Error(i3).*cos(Phase_Error(i3))));
%plot(time1,I1OK(i3,:), 'b',time1,Q1OK(i3,:), 'r');drawnow
end

%Volvemos a hacer un fit a las señales ya corregidas, repetimos el
mismo
%proceso seguido en la parte 1 pero en este caso para las señales que
hemos
%generado y corregido, si los parámetros calculados son correctos
%Phase_mismatch=0.
%Ae=1.
%Offset=0.
I1OKoffset=zeros(1,length(f));
I1OKAmp=zeros(1,length(f));
I1OKAmp_2=zeros(1,length(f));
I1OKAmp_3=zeros(1,length(f));
I1OKfase=zeros(1,length(f));
I1OKfase_2=zeros(1,length(f));
I1OKfase_3=zeros(1,length(f));
I1OKfreq=zeros(1,length(f));
I1OKfit=zeros(length(f),length(time1));
Q1OKoffset=zeros(1,length(f));
Q1OKAmp=zeros(1,length(f));
Q1OKAmp_2=zeros(1,length(f));
Q1OKAmp_3=zeros(1,length(f));
Q1OKfase=zeros(1,length(f));
Q1OKfase_2=zeros(1,length(f));
Q1OKfase_3=zeros(1,length(f));
Q1OKfreq=zeros(1,length(f));
Q1OKfit=zeros(length(f),length(time1));

%Bucle para hacer fits a cada frecuencia

for i=1:length(f) % Para todas las frecuencia
    Ivstart=[0, IAmp(i), Ifreq(i),
    Ifase(i),IAmp_2(i),IAmp_3(i),Ifase_2(i),Ifase_3(i)];

vEnd_I1OK=nlinfit(time1,I1OK(i,:),@funcion2,Ivstart,statset('MaxIter',
300));
    I1OKfit(i,:)=funcion2(vEnd_I1OK,time1);
    I1OKoffset(i)=vEnd_I1OK(1);
    I1OKAmp(i)=vEnd_I1OK(2);
    I1OKfreq(i)=vEnd_I1OK(3);
    I1OKfase(i)=vEnd_I1OK(4);
    I1OKAmp_2(i)=vEnd_I1OK(5);
    I1OKAmp_3(i)=vEnd_I1OK(6);
    I1OKfase_2(i)=vEnd_I1OK(7);
    I1OKfase_3(i)=vEnd_I1OK(8);

vEnd_Q1OK=nlinfit(time1,Q1OK(i,:),@funcion2,Qvstart,statset('MaxIter',
200));
    Q1OKfit(i,:)=funcion2(vEnd_Q1OK,time1);
    Q1OKoffset(i)=vEnd_Q1OK(1);
    Q1OKAmp(i)=vEnd_Q1OK(2);
    Q1OKfreq(i)=vEnd_Q1OK(3);

```

ANEXO V

RUTINA DE CALIBRACIÓN IQ

```

    Q1OKfase(i)=vEnd_Q1OK(4);
    Q1OKAmp_2(i)=vEnd_Q1OK(5);
    Q1OKAmp_3(i)=vEnd_Q1OK(6);
    Q1OKfase_2(i)=vEnd_Q1OK(7);
    Q1OKfase_3(i)=vEnd_Q1OK(8);
    Qvstart=vEnd_Q1OK;

plot(timel,I1OK(i,:), 'r',timel,I1OKfit(i,:), 'g',timel,Q1OK(i,:), 'b',ti
mel,Q1OKfit(i,:), 'c');drawnow

end
while min(I1OKfase)<0
    I1OKfase=I1OKfase+2*pi;
end
while min(Q1OKfase)<0
    Q1OKfase=Q1OKfase+2*pi;
end
while min(I1OKfase)>2*pi
    I1OKfase=I1OKfase-2*pi;
end
while min(Q1OKfase)>2*pi
    Q1OKfase=Q1OKfase-2*pi;
end

maxI1OK=zeros(1,801);
maxQ1OK=zeros(1,801);
I1OK_N=zeros(size(I1OK));
Q1OK_N=zeros(size(Q1OK));
for i=1:length(f)
    maxI1OK(1,i)=max(I1OK(i,:));
    maxQ1OK(1,i)=max(Q1OK(i,:));
    I1OK_N(i,:)=I1OK(i,:)./maxI1OK(1,i);
    Q1OK_N(i,:)=Q1OK(i,:)./maxQ1OK(1,i);
    plot(timel,I1OK_N(i,:), 'r',timel,Q1OK_N(i,:), 'b');drawnow
end

% Script para la corrección del error del fit.
%En ocasiones el fit pone la amplitud negativa y le suma un cambio de
180 a
%la fase. Esto produce que si Amplitudel es positivo y Amplitude2 es
%negativo, entonces Ae es negativo. Si phase_mismatch está comprendido
%entre 90 y -90 entonces se añade a los datos un cambio de fase,
%invirtiendo el phase-shift de brillouin detectado

for il=1:1:frequency_scanned

    if I1OKAmp(il)<0
        I1OKAmp(il)=-I1OKAmp(il);
        I1OKfase(il)=I1OKfase(il)-pi;
    end
    if I1OKAmp_2(il)<0
        I1OKAmp_2(il)=-I1OKAmp_2(il);
        I1OKfase_2(il)=I1OKfase_2(il)-pi;
    end
    if I1OKAmp_3(il)<0
        I1OKAmp_3(il)=-I1OKAmp_3(il);

```

```

        I1OKfase_3(i1)=I1OKfase_3(i1)-pi;
    end
    if Q1OKAmp(i1)<0
        Q1OKAmp(i1)=-Q1OKAmp(i1);
        Q1OKfase(i1)=Q1OKfase(i1)-pi;
    end
    if Q1OKAmp_2(i1)<0
        Q1OKAmp_2(i1)=-Q1OKAmp_2(i1);
        Q1OKfase_2(i1)=Q1OKfase_2(i1)-pi;
    end
    if Q1OKAmp_3(i1)<0
        Q1OKAmp_3(i1)=-Q1OKAmp_3(i1);
        Q1OKfase_3(i1)=Q1OKfase_3(i1)-pi;
    end
end

% Resultados de la calibración IQ
if mean(I1OKfase)>mean(Q1OKfase)           %Para corregir el canal Q en
función del canal I                         %Ponemos la fase de Q por encima
    Q1OKfase=Q1OKfase+2*pi;                 de la fase de I
end
phase_mismatch_resul(:,A)=abs(I1OKfase-Q1OKfase+pi/2);
if abs(mean(phase_mismatch_resul))>1
    phase_mismatch_resul(:,A)=abs(I1OKfase-Q1OKfase+3*pi/2);
end
Ae_fit_resul(:,A)=abs(I1OKAmp-Q1OKAmp);

phase_mismatch(:,A)=Phase_Error;%(180/pi)*(Ifase-Qfase)-90; %
ASEGURARSE QUE CUANDO UTILIZA ESTO LO VUELVE A PASAR A RADIANTES
Ae(:,A)=(QAmp(:,A))./(IAmp(:,A)); %% Ojo calculo la amplitud total
teniendo en cuenta el termino no lineal

end

figure
plot(f,phase_mismatch_resul(:,1),'b',f,phase_mismatch_resul(:,2),'r',f,
,phase_mismatch_resul(:,3),'g')
xlabel('MHz')                               %lo más cercano a cero posible
ylabel('fase(rad)')
title('phase mismatch restante')

figure
plot(f,Ae_fit_resul(:,1),'b',f,Ae_fit_resul(:,2),'r',f,Ae_fit_resul(:,
3),'g')
xlabel('MHz')                               %lo más cercano a cero posible
ylabel('fase(rad)')
title('Amplitude error restante')
beep
%% Guardo los parámetros de corrección
save(nombre, 'phase_mismatch','Ae', 'Qoffset',
'Ioffset','IAmp','QAmp', 'maxI1OK', 'maxQ1OK');
%Para guardar todo
%save(nombreTodo);

```



ANEXO V

RUTINA DE CALIBRACIÓN IQ

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Zornoza, D. Olier, M. Sagues, and A. Loayssa, "Brillouin distributed sensor using RF shaping of pump pulses," *Measurement Science and Technology*, vol. 21, 094021, 2010.
- [2] A. Zornoza, D. Olier, and A. Loayssa, "Self-heterodyne synchronous detection for SNR improvement and distributed Brillouin phase shift measurements in BOTDA sensors," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 7753, paper. 77532F, 2011.
- [3] A. Zornoza, D. Olier, M. Sagues, and A. Loayssa, "Brillouin spectral scanning using the wavelength dependence of the frequency shift," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 382-383, 2011.
- [4] M. Sagues, A. Loayssa, and J. Capmany, "Multitap complex-coefficient incoherent microwave photonic filters based on stimulated Brillouin scattering," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, pp. 1194-1196, 2007.
- [5] D. Alasia, M. González Herráez, L. Abrardi, S. Martín-López, and L. Thévenaz, "Detrimental effect of modulation instability on distributed optical fiber sensors using stimulated Brillouin scattering," *Proceedings of SPIE* 5855, pp. 587-590, 2005.
- [6] A. Zornoza, A. Minardo, R. Bernini, A. Loayssa, and L. Zeni, "Pulsing the probe wave to reduce nonlocal effects in Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, pp. 1067-1068, 2011.
- [7] A. Zornoza, R. A. Pérez-Herrera, C. Elosua, S. Diaz, C. Barriain, A. Loayssa, and M. Lopez-Amo, "Long-range hybrid network with point and distributed Brillouin sensors using Raman amplification," *Optics Express*, vol. 18, pp. 9531-9541, 2010.
- [8] Javier Urricelqui Polvorines, *Medidas dinámicas en sensores distribuidos basados en dispersión Brillouin estimulada*. Memoria trabajo fin de máster.

[9] Ander Zornoza Indart, Trabajo Final del master en tecnologías de comunicación

[10] Adrián Zudaire Echávarri, Desarrollo de una aplicación para la fabricación y ensayo de equipos electrónicos.

[Gei99] Geinitz, E., Jetschke, S., Röpke, U., Schröter, S., Willsch, R., & Bartelt, H. (1999). The influence of pulse amplification on distributed fibre-optic brillouin sensing and a method to compensate for systematic errors. *Measurement Science and Technology*, 10(2), 112-116.

[Dem00] DeMerchant, M. D., Brown, A. W., Bao, X., & Bremner, T. W. (2000). Signal processing for a high-spatial-resolution distributed sensor. *Optical Engineering*, 39(6), 1632-1635.

[11] Los manuales de los instrumentos a utilizar.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE
TELECOMUNICACIÓN



MEJORA DEL PROTOTIPO DE SENSOR BRILLOUIN DISTRIBUIDO
BASADO EN LA TÉCNICA DE ANÁLISIS ÓPTICO DE BRILLOUIN EN EL
DOMINIO DEL TIEMPO (BOTDA) DESARROLLADO EN EL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA DE LA
UPNA

Felipe López Fernandino

Director
Mikel Sagüés García

Pamplona, 5 de Septiembre de 2012

OBJETIVO DEL PROYECTO

- Profesional:
 - Mejorar y contribuir al desarrollo del prototipo.
- Personal
 - Aprendizaje sobre metodología de investigación.
 - Adquirir conocimientos a cerca de los SBS.
 - Adquirir conocimientos sobre fibra óptica.

INTRODUCCIÓN A LOS SBS

Qué son:

- Sistema sensor compuesto por:
 - Sistema de análisis
 - Fibra de sensado

Utilidad

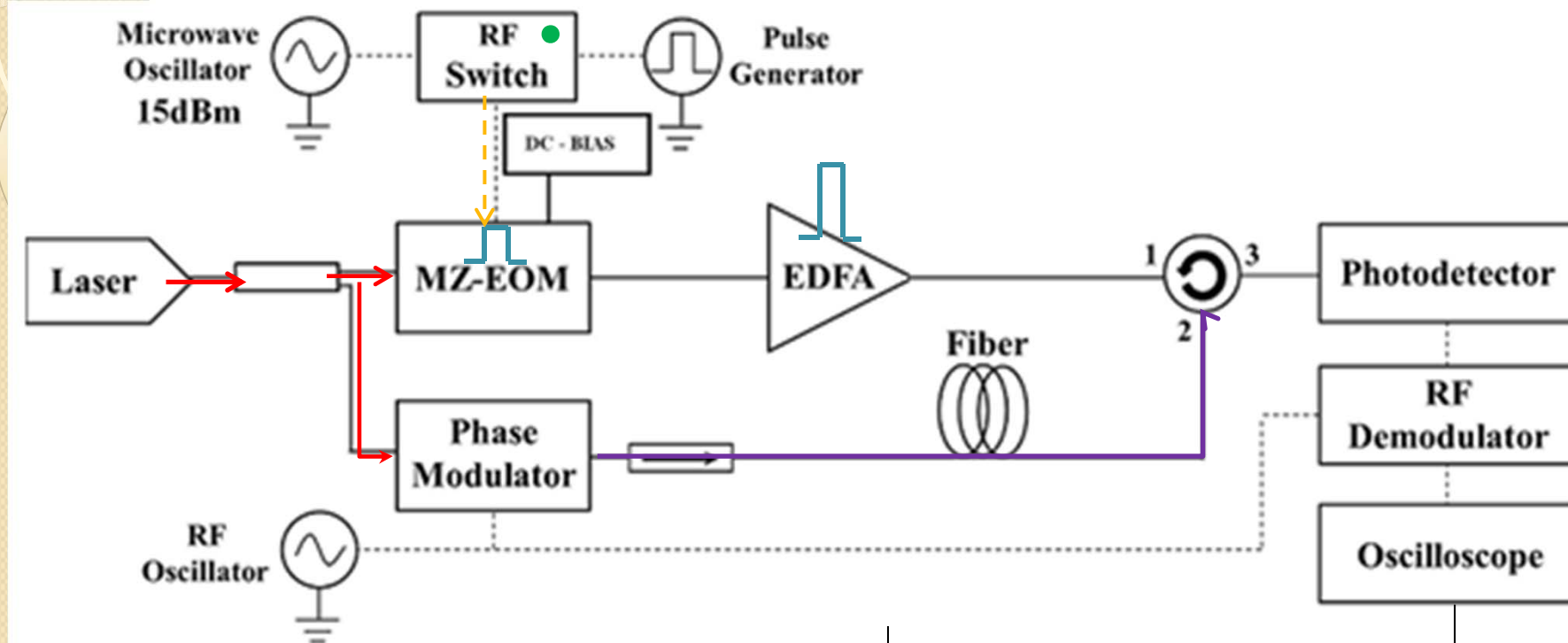
- Medición de deformación y temperatura → Monitorización de salud estructural de infraestructuras.



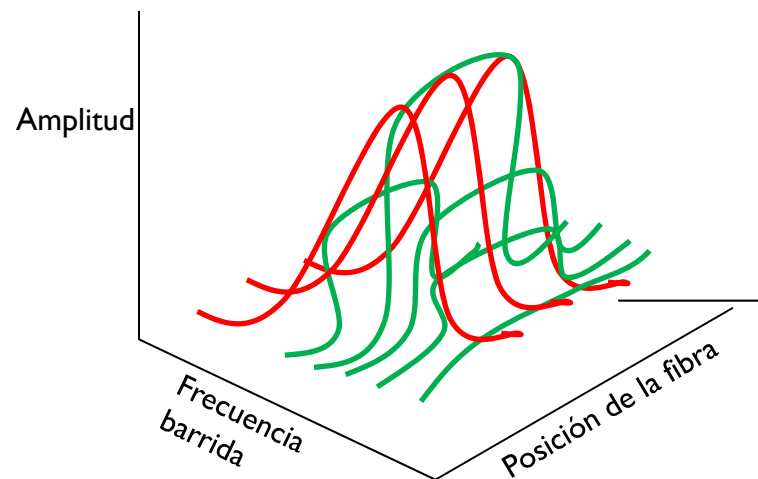
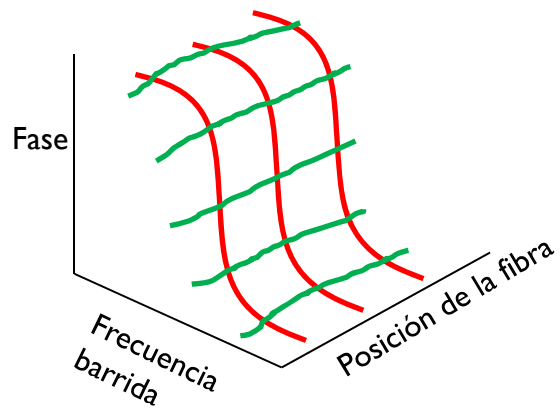
Principio físico de funcionamiento

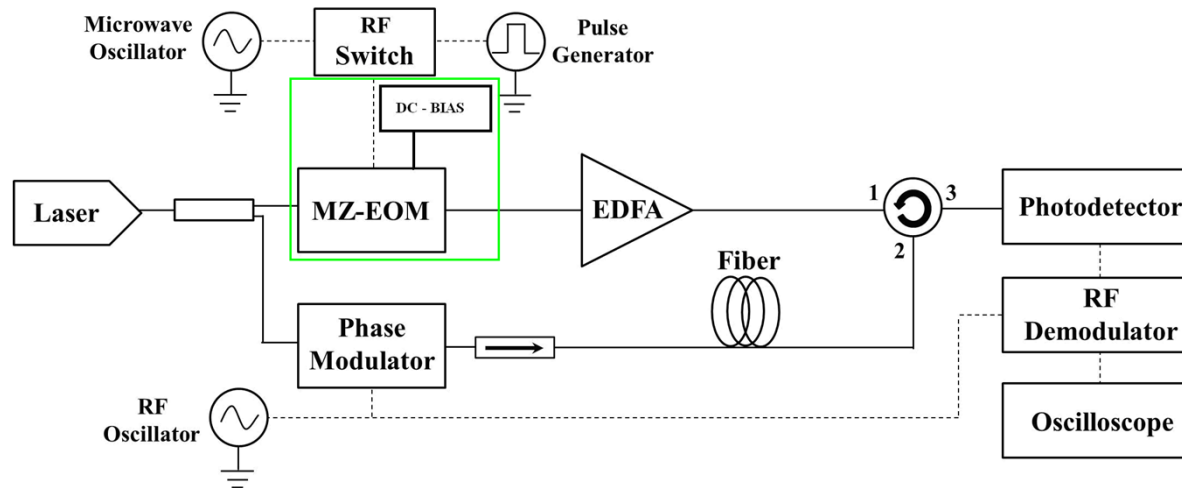


ESTADO ACTUAL DEL PROTOTIPO



★ NEW ★





INTRODUCCIÓN

- El DC-BIAS controla el punto de polarización de un modulador electro óptico (MZ-EOM).
- Requerimiento del sistema: MZ-EOM \rightarrow mínima transferencia.

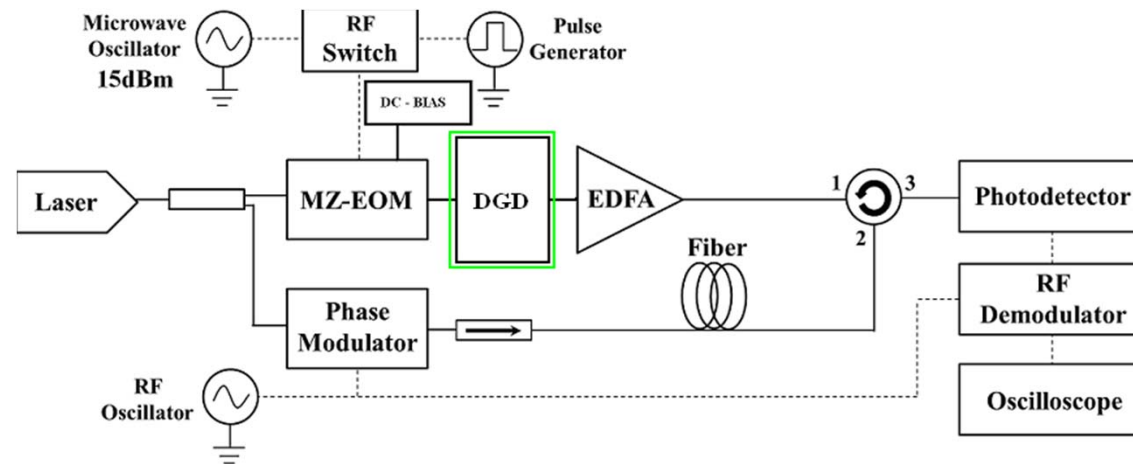
SITUACIÓN ACTUAL

- Actualmente → Labor manual muy tediosa. Durante 90 minutos, cada 5 minutos.

LOGRO DE ESTE PROYECTO

- Se ha automatizado dicho proceso de estabilización.
- Se ha despreocupado al equipo de una labor imprescindible, tediosa y rutinaria.

DGD



INTRODUCCIÓN

- El DGD polariza ortogonalmente las bandas laterales de la señal procedente del MZ-EOM.
- En el futuro se pretende incorporar otro DGD.

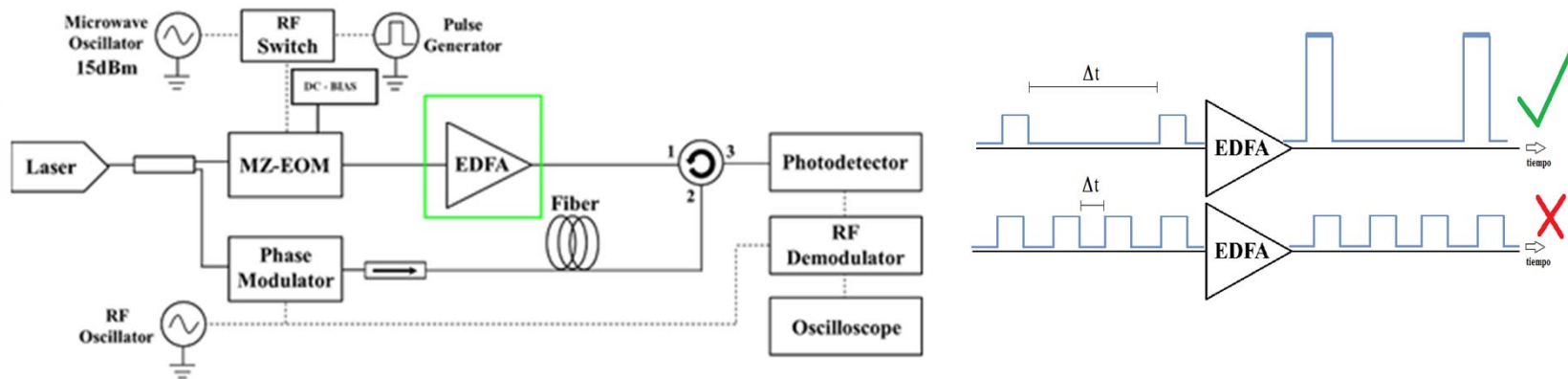
SITUACIÓN ACTUAL

- No se realiza correctamente.
- Se requiere estudiar:
 - Por qué no ortogonaliza correctamente el DGD en uso.
 - El punto óptimo de trabajo del nuevo DGD y su comparación con el DGD en uso.

LOGRO DE ESTE PROYECTO

- DGD en uso se está utilizando lejos de su punto óptimo de trabajo.
- El nuevo DGD es más adecuado para el montaje BOTDA final (mayor ortogonalización)

CARACTERIZACIÓN EDFA



INTRODUCCIÓN

- El EDFA es un amplificador óptico → amplifica la señal proveniente del MZ-EOM
- Es una señal pulsada.

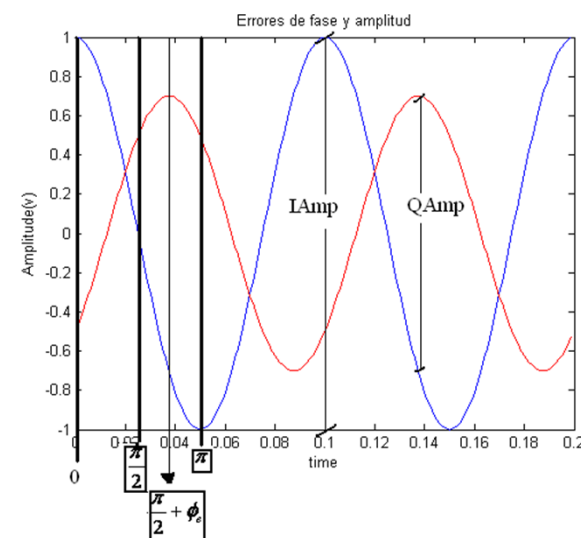
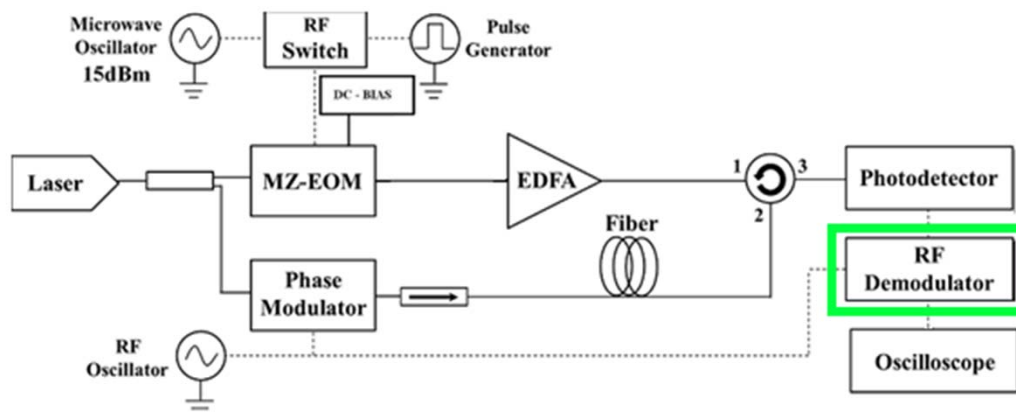
SITUACIÓN ACTUAL

- Si los pulsos llegan con un intervalo temporal pequeño, el EDFA se satura.
- Intervalo mínimo entre pulsos que garantiza un correcto funcionamiento del EDFA y con ello saber si, es adecuado para el prototipo sensor.

LOGRO DE ESTE PROYECTO

- Se ha concluido que el EDFA cubre las necesidades del prototipo sensor, por lo tanto se considera adecuado.

CORRECCIÓN IQ



INTRODUCCIÓN

- El demodulador RF realiza una detección IQ de la señal procedente del foto detector y así pasarla a banda base.

SITUACIÓN ACTUAL

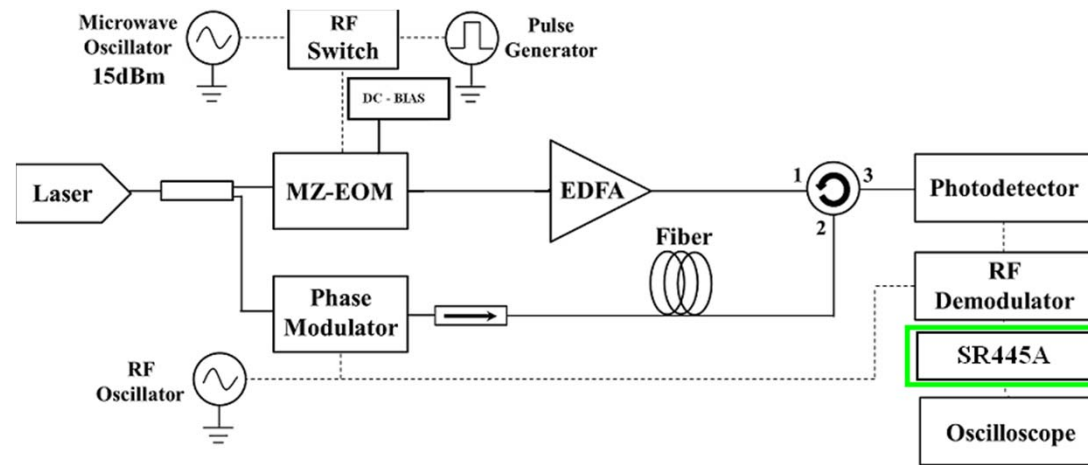
- Dicha detección IQ no es perfecta, se han detectado errores de amplitud y fase.
- Una calibración IQ corrige esos errores. Se realiza de manera manual y se desea automatizar el proceso.

LOGRO DE ESTE PROYECTO

- Se ha automatizado el proceso de calibración IQ.
- Se ha mejorado la precisión de dicha calibración, con lo que los resultados finales han mejorado.
- Se ha detectado que una corrección incorrecta a una medida final BOTDA induce un error en la medida muy a tener en cuenta. (Precisión del sistema=1MHz, error inducido 2MHz).



PREAMPLIFICADOR



INTRODUCCIÓN

- Las medidas de larga distancia sirven para monitorizar deformación en estructuras de gran longitud como oleoductos. Las medidas de este tipo realizadas con el prototipo se realizan con el osciloscopio Picoscope. Este a su vez precisa de un preamplificador. El SR445A.

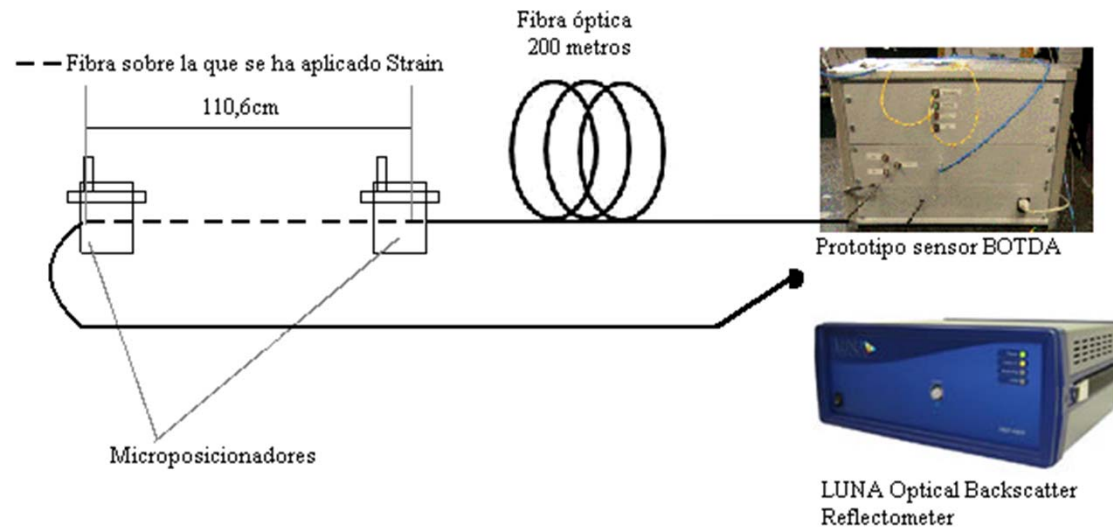
SITUACIÓN ACTUAL

- Necesario → Método de calibración de dicho preamplificador.
 - Amplificación correcta.
 - Igual para todos los canales.

LOGRO DE ESTE PROYECTO

- Se ha elaborado un método fiable de calibración del Preamplificador SR445A, utilizando dispositivos alternativos a los propuestos en el manual de dicho instrumento.
- Se ha documentado para ser replicado en futuras calibraciones.

PRECISIÓN DEL SISTEMA



INTRODUCCIÓN

- El prototipo sensor BOTDA, pretende ser un sistema sensor de fibra óptica capaz de competir en el mercado con los sistemas punteros en el tema. Uno de estos sistemas es el LUNA OBR, con una precisión en sus medidas de $1\mu\epsilon$.

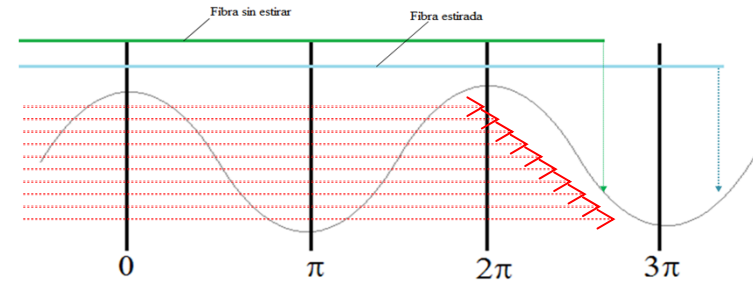
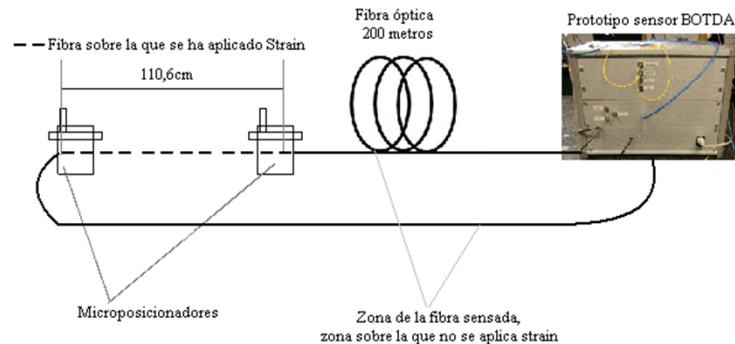
SITUACIÓN ACTUAL

- Precisión del BOTDA $20\mu\epsilon$.
- Son las medidas del BOTDA correctas? → Contraste con el LUNA.

LOGRO DE ESTE PROYECTO

- Los resultados ofrecidos por el prototipo sensor BOTDA, a partir del espectro de amplitud, son correctos dentro de la precisión actual del prototipo.
- Los resultados obtenidos a partir del espectro de fase no son correctos, son un hasta un 8% inferiores al valor sensado con el LUNA, así que tampoco está tan alejados teniendo en cuenta que es una de las líneas en desarrollo.
- El sistema en desarrollo es inmune a cierto grado de contaminación en las medidas.

CUANTIFICACIÓN DEL DESFASE



INTRODUCCIÓN

- Las medidas de deformación unitaria realizadas por los sensores SBS, hasta la fecha, se obtenían a partir del espectro de amplitud. El sistema prototipo en desarrollo es pionero en realizarlas a partir del espectro en fase.
- Ventajas
 - La fase es menos susceptible al ruido.
 - BOTDA dynamic.

SITUACIÓN ACTUAL

- Sin embargo, al sufrir strain un punto de la fibra, esta se alarga, variando así la fase de la señal detectada. Es importante la cuantificación de dicho desfase para la corrección de las medidas a partir del espectro de fase.

LOGRO DE ESTE PROYECTO

- Se ha cuantificado el desfase producido por una elongación de la fibra de 500, 1000 y 1500 μm . Los valores obtenidos son próximos a los calculados teóricamente pero se concluye que el prototipo sensor no es capaz de cuantificar con precisión dicho desfase.
- Se propone realizar el mismo proceso con mayores elongaciones, para cuantificar el mínimo desfase que puede detectar con fiabilidad el prototipo.

MANUAL BOTDA



INTRODUCCIÓN

- Todo dispositivo en desarrollo varía su metodología conforme evoluciona. De la misma forma que conviene tener un protocolo de uso del prototipo, conviene tenerlo documentado. Esto ahorra tiempo a una persona nueva en el equipo que deba realizar medidas.

LOGRO DE ESTE PROYECTO

- Se ha documentado meticulosamente la metodología de funcionamiento de la caja a nivel de usuario.

CONCLUSIÓN

- ✓ Se ha contribuido al desarrollo y mejora del prototipo sensor.
 - ✓ Descarga de trabajo al equipo.
 - ✓ Mejora de las medidas.
 - ✓ Caracterización de componentes.
- ✓ Aprendizaje sobre metodología de investigación.
- ✓ Aprendizaje acerca de SBS y FO.
- ✓ Prueba superada.

